



TESIS-RC 092399

**ANALISA NUMERIK BRONJONG KAWAT
BERANGKUR**

RISKI PURWANA PUTRA
3112202007

DOSEN PEMBIMBING
Ali Limam, Prof.
Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS-RC 092399

NUMERICAL ANALYSIS OF THE WIRE MESHED NET ANCHORAGED

RISKI PURWANA PUTRA
3112202007

SUPERVISORS

Ali Limam

Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.

MASTER PROGRAM
STRUCTURAL ENGINEERING
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

RISKI PURWANA PUTRA
NRP. 3112 202 007

Tanggal Ujian : 29 September 2014
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui Oleh :



1. Data Iranata ST., MT., Ph.D
NIP. 19800430 200501 1 002

(Pembimbing)

Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto M.T.
NIP. 19640405 199002 1 001

ANALISA NUMERIK BRONJONG KAWAT BERANGKUR

Nama mahasiswa : Riski Purwana Putra
NRP : 3112202007
Pembimbing : 1. Ali Limam, Prof.
2. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.

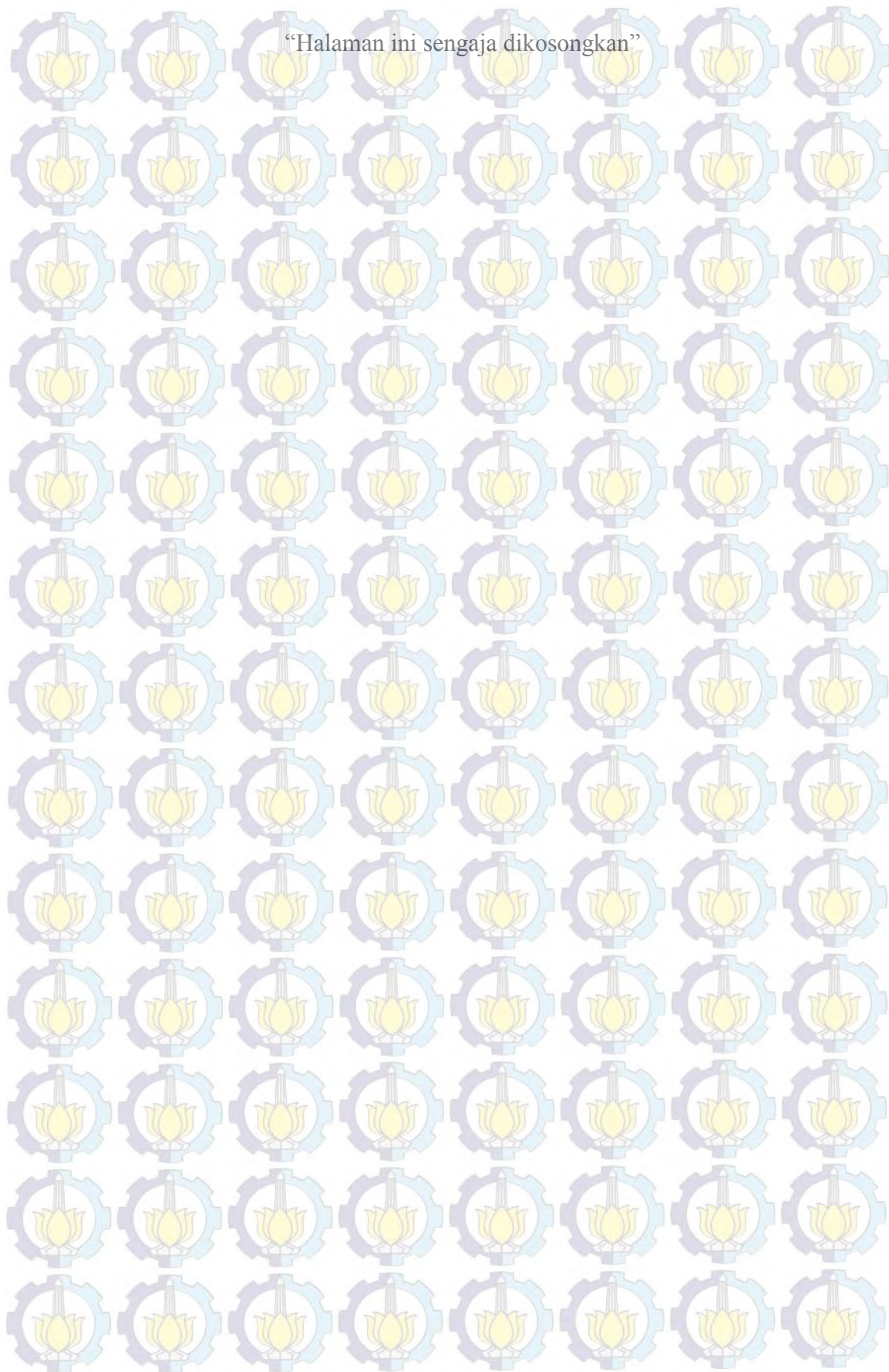
ABSTRAK

Bahaya runtuh batuan pada tebing, seperti di daerah pegunungan, kawasan pertambangan, dewasa ini, harus digolongkan menjadi salah satu perhatian tersendiri dalam pengelolaan resiko bencana. Hal ini merupakan langkah penting untuk mengantisipasi terjadinya kecelakaan kerja, kerusakan infrastruktur, dan berkurangnya produktivitas. Mencegah terjadinya seluruh kejadian runtuh batuan adalah hal yang tidak mungkin bisa dilakukan. Akan tetapi, pemasangan perangkat *active protection*, seperti bronjong kawat berangkur termasuk salah satu upaya mengurangi potensi runtuh batuan dan dirancang untuk mencegah selip pada permukaan tanah.

Penelitian ini dilakukan dengan bantuan analisa numerik metode elemen hingga, *ABAQUS v.6.12*, dan bertujuan untuk mengkaji perilaku bronjong kawat penahan batuan terhadap beban *quasi-static*. Beberapa konfigurasi kawat yang diteliti adalah jenis *double twisted hexagonal wire-meshed net* dengan 5 ukuran kawat dan susunan kabel tendon baja berbeda, yaitu dengan ukuran tanpa kabel: (i) 60x80mm, (ii) 100x120mm, (iii) 100x120mm, dan dua lainnya dengan tambahan kabel: (iv) satu, dan (v) dua kabel.

Konfigurasi bronjong kawat ukuran 100x120 mm dengan dua kabel tendon baja disimpulkan sebagai konfigurasi kawat yang memiliki kapasitas beban yang paling besar.

Kata kunci : bronjong kawat, kabel tendon baja, metode elemen hingga.



NUMERICAL ANALYSIS OF THE WIRE-MESHED NET ANCHORAGED

By : Riski Purwana Putra
Student Identity Number : 3112202007
Supervisors : 1. Ali Limam, Prof.
2. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.

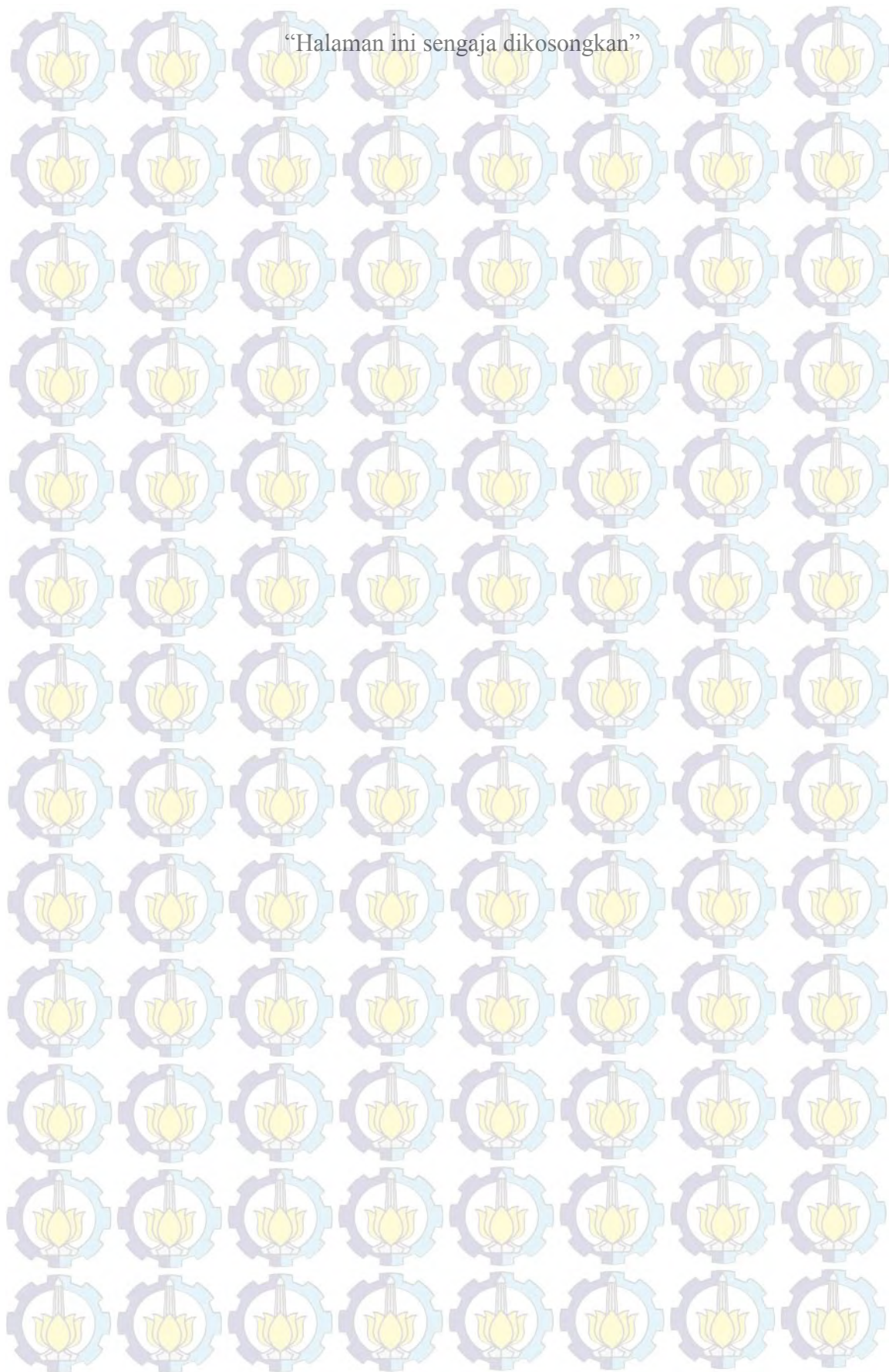
ABSTRACT

The rockfall hazard in areas such as mountainous regions, quarries and mines needs to be well managed. This is essential in order to avoid fatalities, damage to infrastructure and production losses. Preventing all rockfall events is almost impossible, but the installation of rockfall protection systems is a common and effective way to control the hazard. The installation of wire-meshed net anchored is a possible solution to prevent slippage of landslide of the surface layers.

This research was conducted with the help of numerical analysis of finite element method, ABAQUS v.6.12, and aims to examine the behavior of rock gabion retaining wire on quasi-static loads. Some wire configurations studied are the type of double twisted hexagonal wire-meshed net with 5 cable wire size and composition of the steel tendons are different, ie the size without cable: (i) 60x80mm, (ii) 100x120mm, (iii) 100x120mm, and the other two with additional cable (iv) one, and (v) the two wires.

Configuration gabion wire size 100x120 mm with two steel tendons cable concluded as wire configuration that has the greatest load capacity.

Key words: wire mesh net, cable net, finite element analysis.





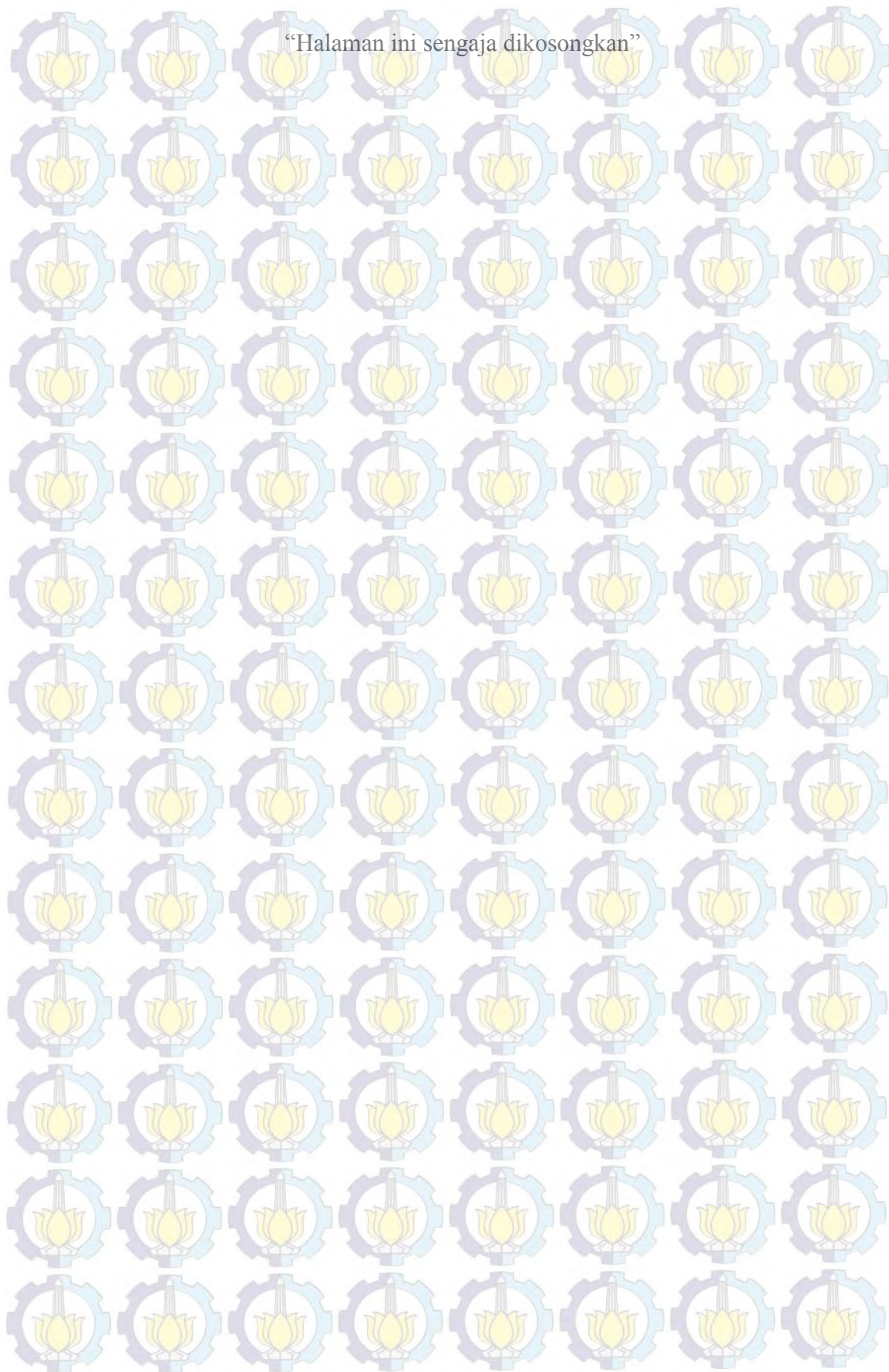
REMERCIEMENT

Je voudrais remercier toutes les personnes qui travaillent en laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnementale (LGCIE), site Coulomb 2 de l'INSA de Lyon qui m'ont accueilli et m'ont aidé réaliser ce travail, je les remercie énormément. Je voudrais aussi remercier mon tuteur de stage, Professeur Ali LIMAM pour son support et ses conseils pendant le stage.

Je remercie également TRAN Dinh Cuong de sa disponibilité pour répondre à mes questions, échanger et discuter avec lui autour de mon sujet. Je voudrais remercier Sylvie LORETTO de sa disponibilité pour corriger mon rapport linguistiquement.

Je remercie mes collègues avec lesquels j'ai suivi les modules de master MEGA à l'INSA pour tous les bons moments passés ensemble et pour leur solidarité.

Enfin, je remercie aussi ma famille (ma mère, mon père, mes frères) à Sampang pour son aide et ses prières pour leur soutien. De plus, je remercie aussi à mes amis de PPI à Lyon.



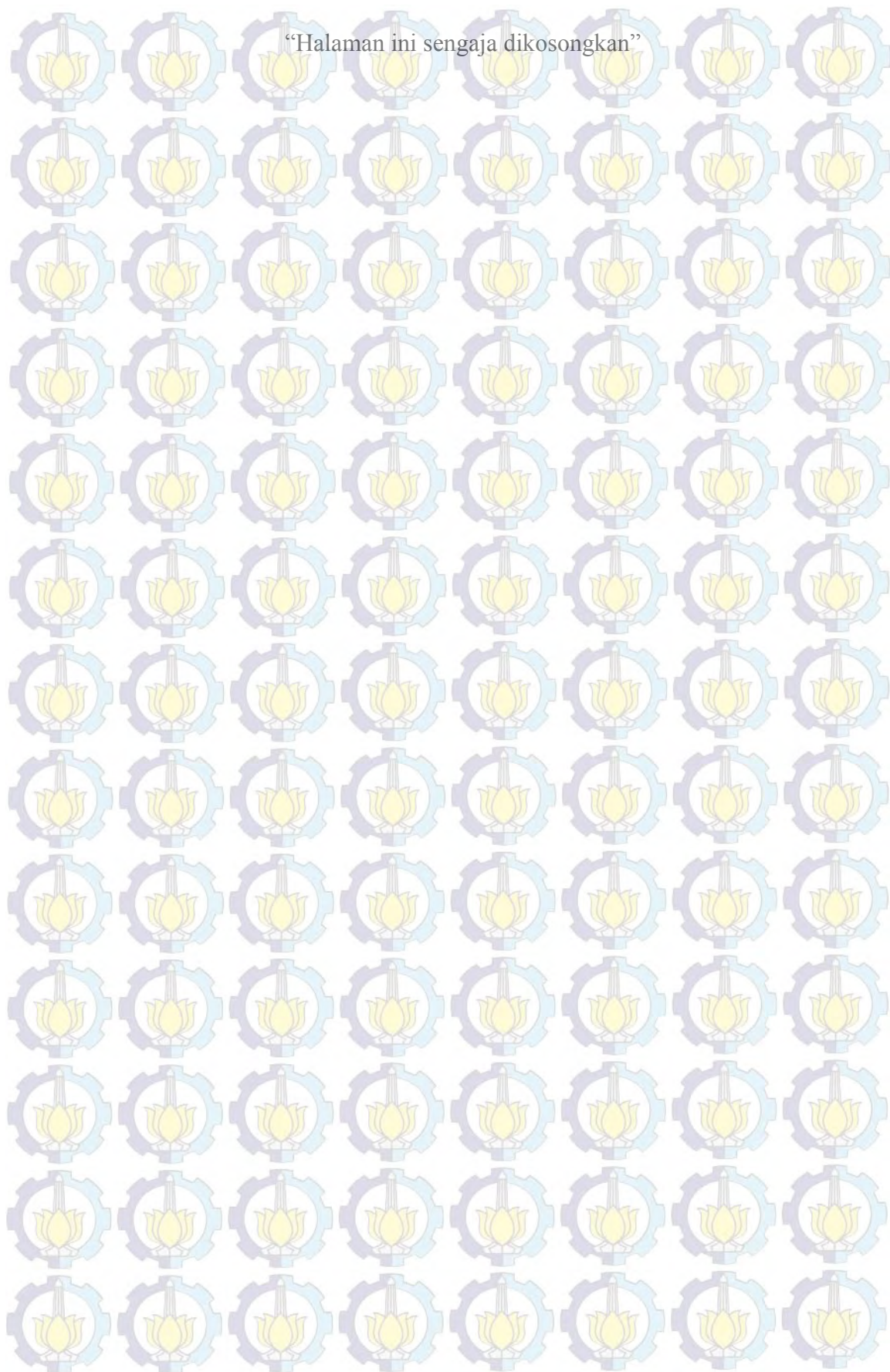
LISTE DES CONTENTS

REMERCIEMENT	1
ABSTRAK	3
LISTE DES CONTENTS	7
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX	11
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	13
CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIE	15
2.1. Systèmes de protection	15
2.2. Caractéristique des grillages	16
2.2.1. Grillage 500 MPa	17
2.2.2. Grillage TECCO	18
2.2.3. Essai de traction sur simple fil et à double torsion	19
2.3. Caractérisation du câble	20
2.4. Caractérisation d'ancrage	22
2.4.1. Principaux modes de défaillance	24
2.5. Estimation de la sollicitation du sol	25
2.5.1. Paramètre Ka	27
2.5.2. Paramètre l	27
2.5.3. Paramètre Fa	27
2.6. Méthodes des éléments finis	29
2.6.1. Analyse quasi-statique	30
2.6.2. Analyse dynamique	31
2.6.3. Simulation numérique	32
CHAPITRE 3 : INVESTIGATION DES ESSAIS	35
3.1. Introduction	35
3.2. Présentation du dispositif	35
3.3. Résultats	38

3.4. Conclusion.....	39
CHAPITRE 4 : MODELISATION NUMERIQUE.....	41
4.1. Présentation du modèle	41
4.2. Validation numérique.....	43
4.3. Calcul de la fréquence.....	45
4.4. Etude de convergence du maillage.....	46
4.5 Modélisation quasi-statique par la méthode Explicite	50
4.5.1. Energies interne-cinétique	50
4.5.2. Déformée des grillages.....	54
4.5.3. Courbe force-déplacement.....	59
4.5.4. Limite d'élasticité	61
CONCLUSION.....	71
BIBLIOGRAPHIE.....	73

LISTE DES TABLEAUX

<i>Table 1. Caractéristiques du grillage 500MPa 60x80. (Jeannin, 2013)</i>	17
<i>Table 2. Caractéristiques du grillage 500MPa 100x120. (Jeannin, 2013)</i>	18
<i>Table 3. Caractéristiques du TECCO. (Jeannin, 2013)</i>	19
<i>Table 4. Propriétés des filets utilisés</i>	38
<i>Table 5. Résumé de la force pour la modélisation</i>	39
<i>Table 6. Propriétés de membrane utilisé</i>	40
<i>Table 7. Résultats de la norme de la fréquence</i>	45
<i>Table 8. Résultats de la norme du déplacement à l'effet de maillage en grillage</i>	47
<i>Table 9. Résultats de la norme du déplacement en membrane</i>	48
<i>Table 10. Résultats de la norme de la contrainte en membrane à l'effet de maillage en membrane</i>	49
<i>Table 11. Comparaison des déplacements expérimental et numérique</i>	58
<i>Table 12. Propriétés de quelques matériaux</i>	62
<i>Table 13. Résumé des contraintes Von Mises en analyse numérique</i>	66
<i>Table 14. Résumé des contraintes maximales</i>	70

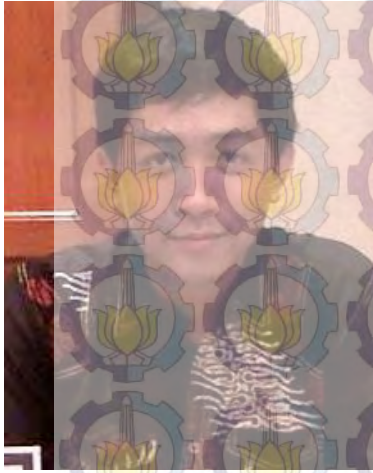


LISTE DES FIGURES

Figure 1. L'application de mailles hexagonales en double torsion en matière de protection des chutes de blocs. (Thoeni, 2012)	13
Figure 2. Boulons d'ancrages pour fixer les blocs instables (GTS, 2011)	13
Figure 3. Installation de filets plaqués par héliportage. (GTS, 2011)	14
Figure 4. Caractéristiques d'une maille hexagonale à double torsion: (Thoeni, 2012)	17
Figure 5. Courbes force-déplacement expérimentales des testés	20
Figure 6. Courbes contrainte-déformation pour (a) simples fils et (b) à double torsion	20
Figure 7. Modèle analytique du câble. (Trad, 2011)	21
Figure 8. Comportement non linéaire du câble en fonction de la pré-tension. (Trad, 2011)	22
Figure 9. Charge de flexion sur l'ancre (Shu, 2005)	23
Figure 10. Principaux modes de défaillance d'ancrage (Shu, 2005)	25
Figure 11. Schéma de la contrainte s'appliquant à un point du talus. (Jeannin, 2013)	26
Figure 12. Schéma montrant à quoi correspond la longueur l . (Jeannin, 2013)	27
Figure 13. Surface sur laquelle s'applique la contrainte σ_a . (Jeannin, 2013)	27
Figure 14. Coupe verticale du talus avec la contrainte non uniforme. (Jeannin, 2013)	28
Figure 15. Schéma de la résultante de la poussée du sol sur le grillage. (Jeannin, 2013)	28
Figure 16. Position du banc de modélisation (la zone étudiée) (Jeannin, 2013)	29
Figure 17. Zone d'étude de la modélisation (2D). (Jeannin, 2013)	29
Figure 18. Analogie pour les cas de charge lente et rapide.	31
Figure 19. Configuration des grillages	35
Figure 20. Position du banc d'essai par rapport au maillage d'ancrage réel. (Jeannin, 2013)	36
Figure 21. Schéma de la contrainte appliquée sur le grillage (Jeannin, 2013)	36
Figure 23. Citernes placées dans le bac et remplies d'eau. (Jeannin, 2013)	36
Figure 22. Dispositif d'essai terminé avec la configuration à 2 câbles installée. (Jeannin, 2013)	36
Figure 24. Schéma de la force P résultante équivalent des citernes sur le grillage sous l'effet de la force des vérins	37
Figure 25. Résultat des essais grandeur nature (Jeannin, 2013)	38
Figure 26. Déplacements moyens de chaque configuration pour une sollicitation de 20 kN. (Jeannin, 2013)	39
Figure 27. Courbe de chargement des grillages non câble de maille 60x80mm. (Jeannin, 2013)	39
Figure 28. Courbe de chargement des configurations à 2 câbles. (Jeannin, 2013)	40
Figure 29. Nœuds au milieu de la surface des grillages où s'applique la force, soit 20cmx20cm	39
Figure 30. Schéma le chargement	40

Figure 31. Conditions aux limites du modèle	40
Figure 32. La taille détaillé	41
Figure 33. Schéma le contact du modèle	41
Figure 34. Courbe de comportement du matériau grillage utilisé. (Thoeni, 2012)	42
Figure 35. Courbe de comportement du câble utilisé. (Fresno, 2013)	42
Figure 36. Iso-valeur U2 (sens vertical)	44
Figure 37. Iso-valeur contrainte maximale	44
Figure 38. Graphe du déplacement max en fonction de nombre d'élément	47
Figure 39. Modèle de membrane avec un maillage 30 x 30	48
Figure 40. Graphe déplacement max en fonction de nombre de l'élément	49
Figure 41. Graphe contrainte max en fonction de nombre de l'élément	50
Figure 42. Energie interne-cinétique pour les grillages 60x80 mm sans câble	51
Figure 43. Energie interne-cinétique pour les grillages 100x120 mm sans câble	52
Figure 44. Energie interne-cinétique pour les doubles grillages 100x120 mm sans câble	52
Figure 45. Energie interne-cinétique pour les grillages 100x120 mm avec 1 câble	53
Figure 46. Energie interne-cinétique pour le grillage 100x120 mm avec 2 câbles	53
Figure 47. Energie interne-cinétique pour le grillage TECCO	54
Figure 48. Formes des déformées numérique des grillages	55
Figure 49. Iso-valeur du déplacement U33	58
Figure 50. Résultats numérique/expérimental pour les grillages 60x80 sans câble	59
Figure 51. Résultats numérique/expérimental pour les grillages 100x120 avec 2 câbles	59
Figure 52. Comparaison numérique entre les grillages simple 100x120 et double grillages 100x120	60
Figure 53. Comparaison numérique entre les grillages 100x120 avec 1 câble et 2 câbles	61
Figure 54. Courbe de traction nominale (Fortunier, 2012)	62
Figure 55. Iso-valeur de la contrainte Von Mises	65
Figure 56. Contrainte maximale du grillage 60x80 sans câble	66
Figure 57. Contrainte maximale du grillage 100x120 sans câble	67
Figure 58. Contrainte maximale du grillage 100x120 avec 1 câble	67
Figure 59. Contrainte maximale du grillage 100x120 2 câbles	68
Figure 60. Contrainte maximale de double grillage 100x120	68
Figure 61. Contrainte maximale du TECCO	69

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis dilahirkan di Sampang, 29 Nopember 1990. Setelah menempuh pendidikan formal di SDN Dalpenang 1 (lulus tahun 2002), SMPN 1 Sampang (lulus tahun 2005), dan SMAN 1 Sampang (lulus tahun 2008), penulis melanjutkan pendidikan tinggi melalui program PMDK Beasiswa Unggulan dari Depdiknas tahun 2008 di Jurusan Teknik Sipil ITS Surabaya dan berhasil menyelesaikan program Sarjana selama 3.5 tahun. Penulis dapat dihubungi berkenaan dengan tesis atau kepentingan lain pada alamat email riskipepe@gmail.com

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Les grillages métalliques sont un élément important de divers types de mesures de protection contre les chutes de blocs structurelles, utilisés sur les talus, comme clôtures de capture et système de draperie. Les treillis métalliques couramment utilisés comprennent maillon de chaîne et de mailles hexagonales en double torsion [Muhunthan, 2005]. La figure 1 montre deux applications d'un fil hexagonal en double torsion maillé dans le cadre d'un système de protection contre les chutes de blocs. Le filet métallique, installé dans une structure complexe éboulement de barrière (figure 1a) ou une draperie simple (figure 1b), est l'un des principaux composants de ces systèmes. La conception correcte à la fois du système complet et de chaque composant est clairement d'une importance principale pour la gestion de la sécurité du danger de chute de blocs [Thoeni, 2012].

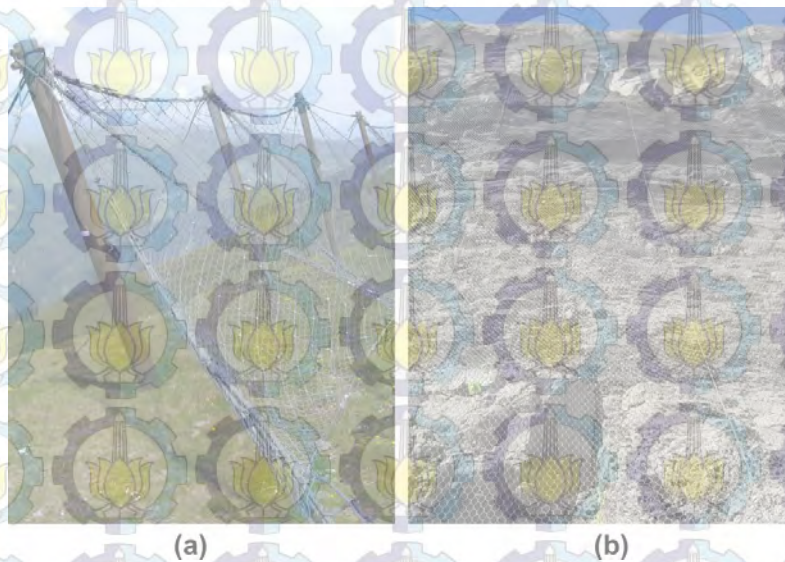
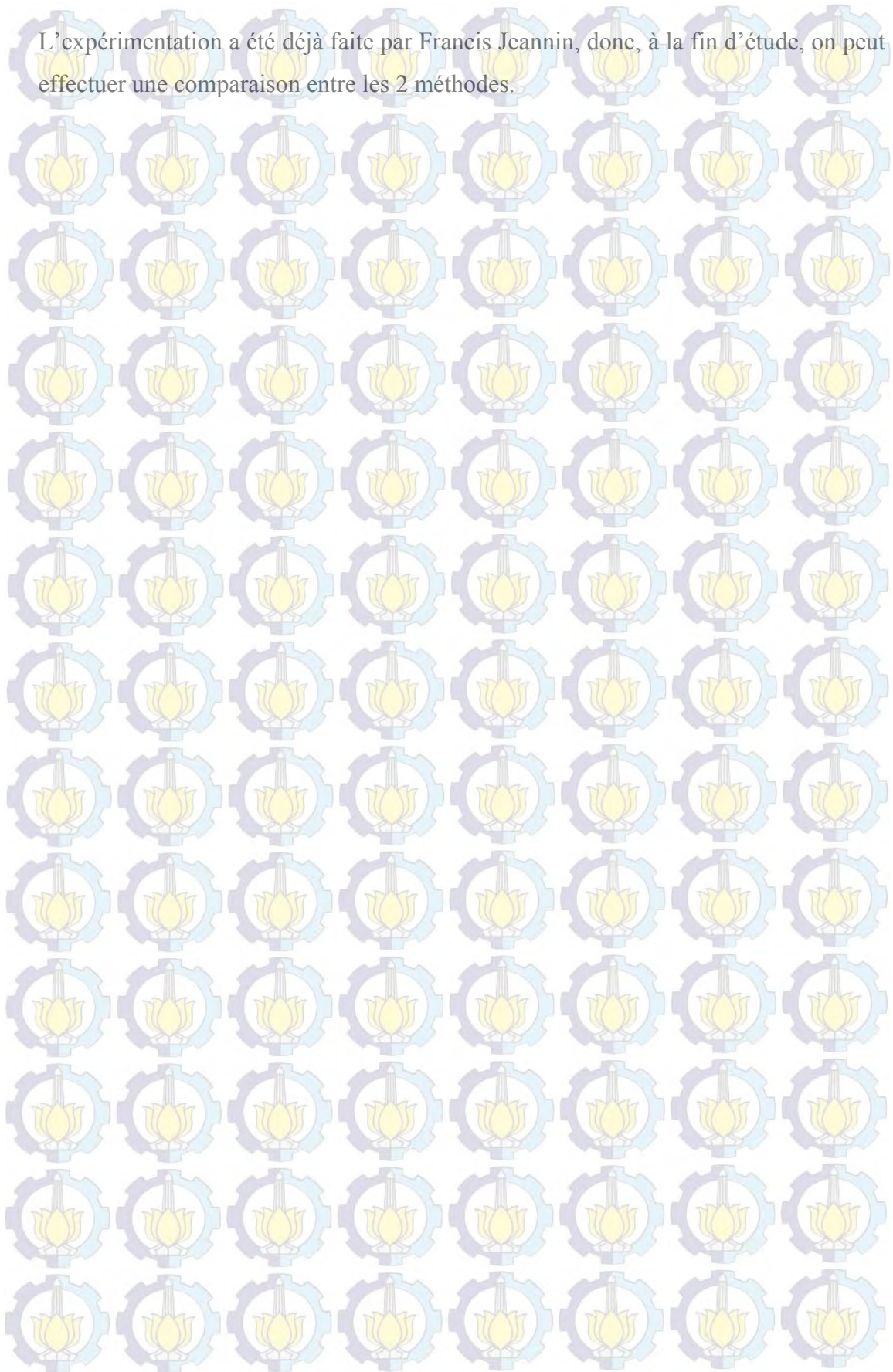


Figure 1. L'application de mailles hexagonales en double torsion en matière de protection des chutes de blocs. (a) clôture de capture chute de pierres et (b) système simple draperie de maille. (Thoeni, 2012)

L'objectif de ce travail est de modéliser des grillages câbles en appliquant un chargement quasi-statique pour certaines configurations présentant.



CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIE

2.1. Systèmes de protection

Il existe un panel important de techniques pour lutter contre l'impact d'un éboulement rocheux. En dehors des actions radicales parfois possibles sur l'aléa (terrassment, minage...) ou sur l'enjeu (tunnel, déviation, interdiction de construire...), la réduction du risque causé par les chutes de pierres sur des infrastructures existantes s'obtient par la mise en place d'ouvrages que l'on peut classer en deux grandes familles : les ouvrages actifs qui empêchent le déclenchement (ancrages, filets plaqués, béton projeté ...) et les ouvrages passifs qui protègent de l'éboulement (écrans pare-pierres, merlons, gabions, galeries en béton) [Trad, 2011]. Parmi les ouvrages de protection dits actifs on distingue :

Les ancrages : lorsque les masses instables sont volumineuses et impossibles à purger mais peuvent se désolidariser à court ou moyen terme, des boulons d'ancrage passifs sont mis en place pour maintenir ces masses au support stable, ils sont dits actifs lorsqu'ils sont mis en tension (Figure 2).

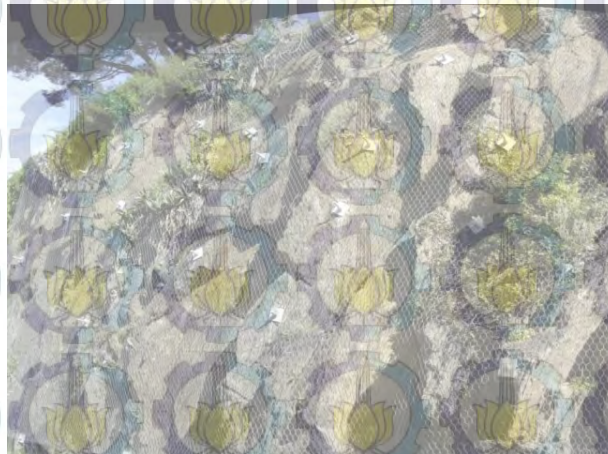


Figure 1. Boulons d'ancrages pour fixer les blocs instables (GTS, 2011)

Les filets plaqués : Ils se posent directement sur les zones de massifs rocheux instables en vue de prévenir les risques d'éboulement (Figure 3). Ils sont ancrés sur leur périphérie mais aussi suivant un maillage interne plus ou moins conséquent. L'efficacité de ces ouvrages actifs est fortement influencée par la pré-tension

appliquée au filet lors de sa mise en œuvre. Leur dimensionnement se faisait à l'aide de relations empiriques confortées par le retour d'expérience [Sasiharan, 2006]. De nouveaux travaux ont permis de caractériser ce type d'ouvrage notamment par des approches quasi-statiques à l'échelle de la nappe ou à l'échelle de la structure entière [Bertrand, 2009].



Figure 2. Installation de filets plaqués par héliportage. (GTS, 2011)

2.2. Caractéristique des grillages

Comme l'a souligné [Bertrand et al.08], les grillages mailles hexagonales sont des systèmes tissés. Ils sont fabriqués en continu par torsion des trois demi-tours des paires de fils d'acier et par l'interconnexion des fils adjacents pour former des ouvertures de forme hexagonale comme montré dans la figure 4. La structure en nid d'abeilles hexagonal, augmentent la résistance macroscopique du treillis métallique et les doubles torsions de sorte que la défaillance d'un seul fil ne compromette pas le panneau. Les côtés latéraux sont tissé mécaniquement avec un fil parallèle en double torsions du même matériau, mais légèrement plus épais. Ce fil de lisière est tissé en continu dans le grillage comme on peut le voir sur la figure 4a.

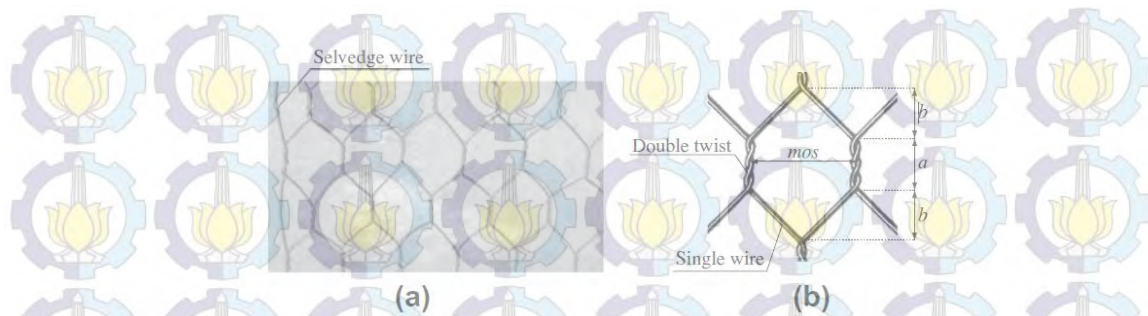


Figure 3. Caractéristiques d'une maille hexagonale à double torsion: (a) vue rapprochée d'un treillis métallique hexagonal en double torsion et (b) la définition de la taille d'un hexagone. (Thoeni, 2012)

La première étape de ce stage a été une étude bibliographique pour cerner le contexte et se positionner par rapport aux grillages existants. Voici quelques données de ce stage, dont les deux grillages les plus intéressants:

2.2.1. Grillage 500 MPa

D'après le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, (le type 60 *c'est-à-dire de dimension de maille 60x80mm), malgré un fil de structure plus fin, est plus résistant globalement que le type 100 *c'est-à-dire 100x120m en raison d'une section moyenne d'acier. En contrepartie, le type 60 sera moins souple que le type 100 et sera donc plus difficile à plaquer dans des reliefs tourmentés». Voici les caractéristiques [Jeannin, 2013] :

Forme des mailles	en hexagone
Longueur	80 mm
Largeur	60 mm
Diamètre du fil	2.7 mm
Résistance du fil	500 N/mm ²
Résistance longitudinale à la traction du filet	47 kN/m

Tableau 1. Caractéristiques du grillage 500MPa 60x80. (Jeannin, 2013)

Mais par faute de disponibilité de ce grillage, du grillage de type 100 a aussi été utilisé. Voici ses caractéristiques :

Forme des mailles	en hexagone
Longueur	120 mm
Largeur	100 mm
Diamètre du fil	2.7 mm
Résistance du fil	500 N/mm ²
Résistance longitudinale à la traction du filet	35 kN/m

Tableau 2. Caractéristiques du grillage 500MPa 100x120. (Jeannin, 2013)

2.2.2. Grillage TECCO

Le TECCO® est fabriqué par l'entreprise Suisse Geobrugg. Il s'agit d'un filet de haute résistance (haute limite élastique) présenté comme une alternative au béton projeté. Le TECCO® est vendu comme un filet pouvant assurer un confinement du sol ou de la roche très altérée. Le principe est d'utiliser cette structure souple en fonctionnement statique. Il faut donc que le sol se déforme légèrement pour que l'effet stabilisateur soit maximum (Jeannin, 2013). Voici les caractéristiques [Jeannin, 2013] :

Forme des mailles	en losange
Longueur	137 mm
Largeur	83 mm
Diamètre du fil	3 mm

Résistance du fil	1770 N/mm ²
Résistance longitudinale à la traction du filet	150 kN/m
Résistance transversale à la traction du filet	57 kN/m

Tableau 3. Caractéristiques du TECCO. (Jeannin, 2013)

Le système de fonctionnement est celui du grillage plaqué. La jonction entre un ancrage et le filet se fait par une plaque à griffe également conçue par Geobrugg.

2.2.3. Essai de traction sur simple fil et à double torsion

Une série d'essai de traction ont été réalisé par [Thoeni, et.al, 2012] sur des fils individuels d'un diamètre de 2,7 mm et 3,4 mm et le double-torsion d'un diamètre de fil de 2,7 mm. La longueur des échantillons est comprise entre 120 et 150 mm et, au cours des essais, les extrémités des fils ont été serrée dans le dispositif d'essai.

Ainsi, la tension a été appliquée à une longueur effective comprise entre 40 et 50 mm. Une vitesse de déformation constante de 5 mm / min a été appliqué aux échantillons, et il a été noté que l'échec lors des essais n'a pas eu lieu au voisinage des pinces.

La figure 5 résume les courbes de tous les tests de fil force-déplacement. La figure 5a montre les courbes obtenues pour les fils individuels. On peut voir que le déplacement axial maximal est le même pour les trois échantillons, tandis que la force axiale maximale du fil de lisières (3,4 mm) est beaucoup plus élevé que celui pour le fil unique (2,7 mm). La figure 5b montre les courbes force-déplacement obtenus pour les trois échantillons en double torsion. Pour un diamètre de fil de 2,7 mm, la force axiale maximale mesurée pour une double torsion était presque deux fois plus que pour un seul fil.

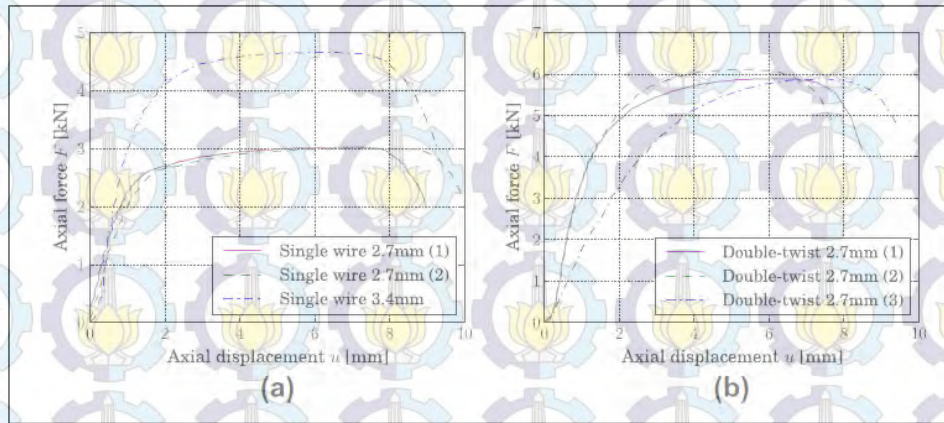


Figure 4. Courbes force-déplacement expérimentales des testés (a) simples fils, et (b) à double-torsion. (Thoeni, et.al, 2012)

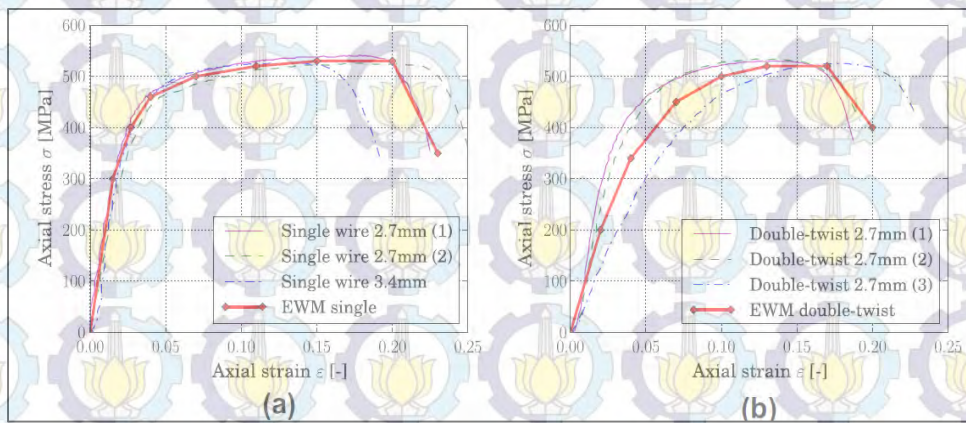


Figure 5. Courbes contrainte-déformation pour (a) simples fils et (b) à double torsion. (Thoeni, et.al, 2012)

2.3. Caractérisation du câble

Le câble est l'élément constitutif de base de la structure, sa fonction première est de transmettre les efforts tout au long du processus de changement de forme que subit la nappe du filet. Il est donc essentiel d'évaluer la capacité portante du câble et la nature du comportement, fragile ou ductile, à l'état ultime.

On s'intéresse ici au cas du câble de poids propre négligeable, tendu selon sa corde avec un effort de précontrainte noté P et soumis ensuite à un effort ponctuel

latéral T s'appliquant à mi-longueur. En particulier, on désire voir de quelle manière la précontrainte P peut réduire la déformation Δ du câble produite par l'effort latéral T.

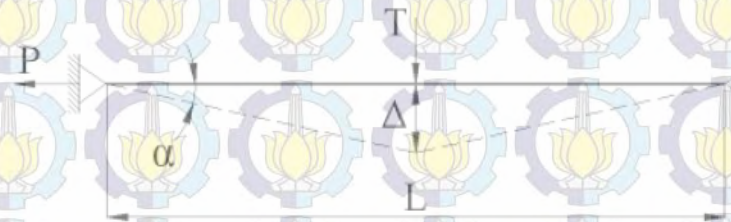


Figure 6. Modèle analytique du câble. (Trad, 2011)

La force perpendiculaire T va créer un effort de traction supplémentaire dans le câble (effort membrane), cet effort de tension génère une elongation δ tel que :

$$\delta = \frac{NS}{ES} \quad (1)$$

E est le module de Young du câble et S sa section.

$$\text{On a encore } \sin \alpha = \frac{\Delta}{(L+\delta)/2} = 2 \times \frac{\Delta}{L} \times \frac{1}{(1+\frac{N}{ES})} \quad (2)$$

L'équilibre de forces donne :

$$2(N+P) \sin \alpha = T$$

$$\text{Donc, } 4(N+P) \frac{\Delta}{L} \times \frac{1}{(1+\frac{1}{ES})} = T \quad (3)$$

L'équation cinématique donne :

$$\sqrt{\Delta^2 + \frac{L^2}{4}} = \frac{1}{2}(L + \delta)$$

$$\text{D'où : } \Delta^2 = \frac{L\delta}{2} \text{ et } 2\left(\frac{\Delta}{L}\right)^2 = \frac{\delta}{L}$$

$$\text{Ou } \delta = \frac{NL}{ES}$$

$$\text{Donc, } \frac{N}{ES} = \frac{\delta}{L} = 2\left(\frac{\Delta}{L}\right)^2$$

Et l'équation (3) devient :

$$4(N+P) \frac{\Delta}{L} \frac{1}{(1+2(\frac{\Delta}{L})^2)} = T$$

$$4 \left[2ES\left(\frac{\Delta}{L}\right)^2 + P \right] \frac{\Delta}{L} \times \frac{1}{(1+2(\frac{\Delta}{L})^2)} = T$$

$$\text{Or } \frac{\Delta}{L} < 1$$

$$\text{D'où } 4 \left[2ES \left(\frac{\Delta}{L} \right)^2 + P \right] \frac{\Delta}{L} = T$$

$$8ES \left(\frac{\Delta}{L} \right)^3 + 4P \frac{\Delta}{L} = T$$

$$8 \left(\frac{\Delta}{L} \right)^3 + 4 \frac{P}{ES} \frac{\Delta}{L} = \frac{T}{ES}$$

$$\text{Posons } \frac{\Delta}{L} = X, \frac{T}{ES} = Y, \text{ et } \frac{P}{ES} = K_0$$

On obtient donc une équation cubique $8X^3 + 4K_0X = Y$

On peut donc tracer $\frac{T}{ES} = f\left(\frac{\Delta}{L}\right)$ soit $Y = f(X)$ pour des valeurs de K_0 fixées

Cette figure ci-dessous montre que le comportement du câble est non linéaire et que la rigidité augmente quand le niveau de pré-tension (P) est plus important.

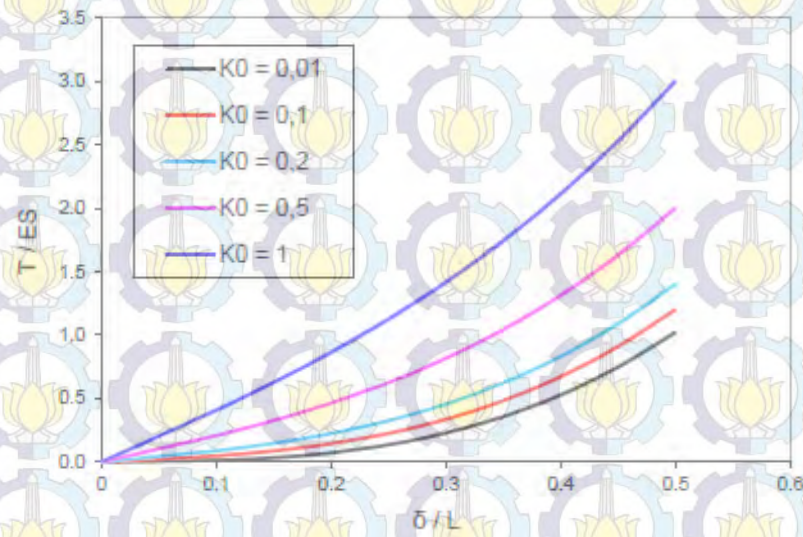


Figure 7. Comportement non linéaire du câble en fonction de la pré-tension. (Trad, 2011)

2.4. Caractérisation d'ancrage

Les systèmes de mailles drapées se composent de trois éléments principaux: les ancrs, des câbles de soutien et des mailles. Bien que ces éléments soient utilisés communément, les composants du système et les détails d'installation varient considérablement en

Amérique du Nord. Les ancrages peuvent être regroupés selon les conditions des roches ou des sols intacts.

Les sources de charge sur les systèmes drapés comprennent le poids de maille, l'impact des chutes de pierres, l'accumulation de débris sous la maille, et l'accumulation de neige / glace sur le dessus de la maille. Le poids de maille est la somme des poids des composants du système, qui comprend le tissu, les cordes de soutien, le laçage des fils et les accessoires connexes. Les modes de transfert de charge à travers la maille sur l'ancrage se produisent d'une manière complexe et peuvent être constitués de tension, de cisaillement et de flexion. L'appui du système est réalisé par l'interface de friction, où la maille est en contact avec la pente, ainsi que les charges portées par les ancrages [Shu, 2005].

Les conditions de pente donnent généralement lieu à des moments de flexion sur les points d'ancrage des tendons rigides (Fig. 8). Ce type de charge de flexion sur le tendon d'ancrage est très souvent négligé. La capacité de l'élément d'ancrage est exposé à un charge qui peut être déterminée par le moment appliqué qui contrôle la répartition des contraintes le long de la section *transversale* du tendon d'ancrage.

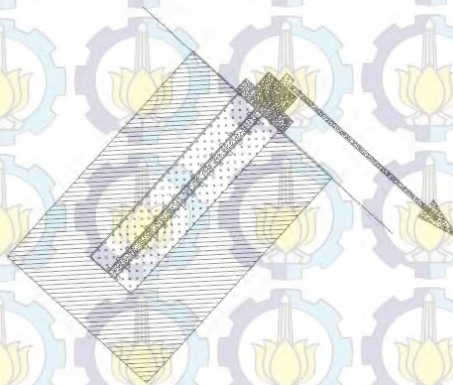


Figure 8. Charge de flexion sur l'ancrage (Shu, 2005)

2.4.1. Principaux modes de défaillance

2.4.1.1. Arrachement du tendon d'ancrage

Ce type de rupture (figure 10a) se produit lorsque la tension appliquée est supérieure à la friction ou à la force de résistance développée entre le tendon d'ancrage ou le tendon d'un câble et l'agent de liaison. La tension sur l'élément d'ancrage est supérieure à la force de l'agent de liaison. Ces défaillances se produisent avec les colles à faible force de liaison.

2.4.1.2. Insuffisance de coulis

Pour les grands coulis de diamètre, lorsque la contrainte développée dans le coulis est élevée, le coulis qui entoure le tendon échoue.

Pour de tels ancrages, la charge horizontale est plus supérieure à la norme, entraînant une défaillance passive de la cheville et le coulis de craquage (figure 10c). Les fissures se propagent progressivement de haut en bas avec l'augmentation de la charge de coulis.

2.4.1.3. Défaillance de bar ou de brin

Une défaillance de la barre d'ancrage ou brin se produit lorsque la traction appliquée, le cisaillement ou la contrainte de flexion dépasse le rendement ou la résistance au cisaillement ou à la capacité de résistance au moment de la matière de tendon. La rupture à la traction de l'élément de précontrainte (figure 10d) se produit habituellement quand il est entouré d'un coulis de forte et moyenne du sol. L'échec même de cisaillement du tendon (figure 10e) se produit lorsque la charge de cisaillement est supérieure à sa résistance au cisaillement. Les résultants contraintes de moment de flexion dépassent la force de la barre d'ancrage elle conduirait au moment de fissuration (figure 10f).

2.4.1.4. Défaillance de terrain

Lorsque la contrainte dans le sol ou de la roche environnante induite par l'ancre arrachement dépasse la résistance au cisaillement du sol ou de la roche, l'échec du sol se produit (figure 10g).

2.4.1.5. Retraite de coulis

L'ampoule ou corps de coulis est tiré lorsque la contrainte de traction dépasse la caution ou de la capacité de résistance de l'organisme de jointoiement au sol ou à la roche (figure 10h). Ce mode de rupture se produit souvent dans la partie profonde d'une ancre.

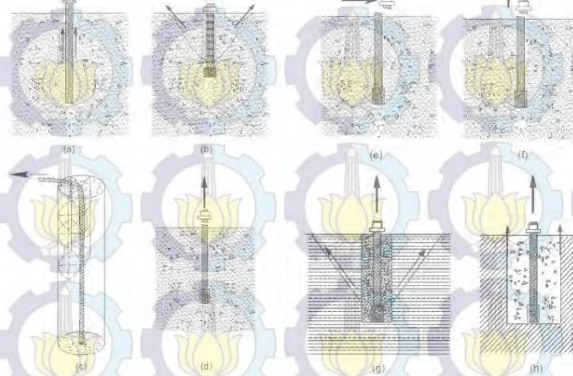


Figure 9. Principaux modes de défaillance d'ancrage : (a) arrachement tendon d'ancrage. (b) insuffisance de coulis (charge verticale). (c) insuffisance de coulis (charge horizontale). (d) l'échec à la traction de l'ancre. (e) l'échec de cisaillement de la cheville. (f) la fissure induite moment d'ancrage des barres d'armature. échec (g) défaillance de terrain (h) retraite de coulis. (Shu, 2005)

2.5. Estimation de la sollicitation du sol

Pour estimer la sollicitation du sol sur le grillage plaqué ancré, l'ouvrage est assimilé à un ouvrage de soutènement. Quelques hypothèses permettent d'adapter grossièrement les principes et raisonnements de dimensionnement des ouvrages de soutènement aux grillages plaqués. D'après l'ouvrage Fondations et ouvrages en terre (G.Philipponnat), la formule des cas simples pour la contrainte de poussée du sol sur un ouvrage de soutènement est :

$$\sigma_a = K_a \cdot \gamma \cdot l \quad (4)$$

Avec :

- K_a le coefficient des terres en poussée prenant en compte divers paramètres comme l'angle de frottement du sol (détailé plus loin)
- γ le poids volumique du sol
- l la hauteur de mur de soutènement au-dessus du point où la contrainte est calculée.

Le fait qu'un sol soit pulvérulent se traduit par un angle de la force de poussée sur l'ouvrage en béton, ce qui ajoute une composante normale au plan favorable au non-glissement. Comme le grillage est plaqué sur la surface du talus et suit ainsi la pente de celui-ci, la poussée du sol est estimée perpendiculaire à la pente du talus (Jeannin, 2013).

Par ailleurs, rappelons que le but de cette étude est de donner un ordre de grandeur de dimensionnement des grillages ancrés plaqués. C'est également pour cela qu'est négligé, n'ayant pas un impact important sur la poussée.

On a donc le schéma suivant :

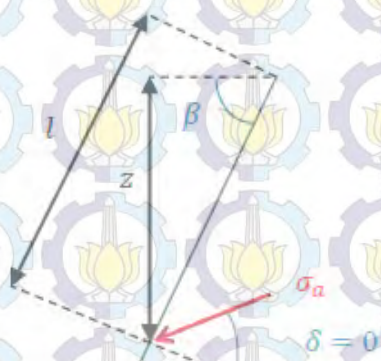


Figure 10. Schéma de la contrainte s'appliquant à un point du talus. (Jeannin, 2013)

2.5.1. Paramètre K_a

Pour simplifier l'utilisation de l'outil final, les tables de Kerisel et Absi (dans le cas d'un équilibre de Rankine) concernant le coefficient des terres ne seront pas utilisées, mais la formule provenant de l'angle des lignes de glissements calculées grâce à un cercle de Mohr :

$$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

2.5.2. Paramètre l

Pour notre cas, la hauteur de talus correspond à une hauteur entre deux points fixes de l'ouvrage, c'est-à-dire pour simplifier **entre deux ancrages** (cf. schéma ci-dessous).

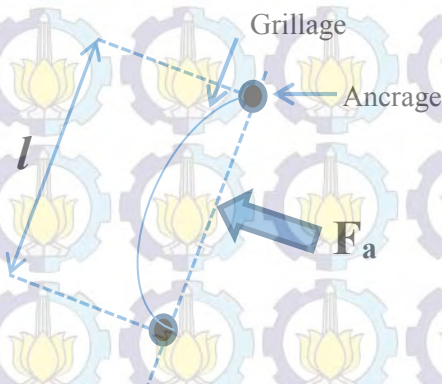


Figure 11. Schéma montrant à quoi correspond la longueur l . (Jeannin, 2013)

2.5.3. Paramètre F_a

La surface concernée par la force résultante de la contrainte de poussée du sol est celle entre 4 ancrages (cf. schémas ci-dessous).

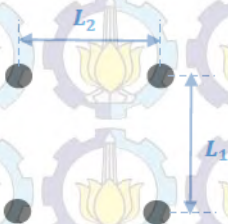


Figure 12. Surface sur laquelle s'applique la contrainte σ_a . (Jeannin, 2013)

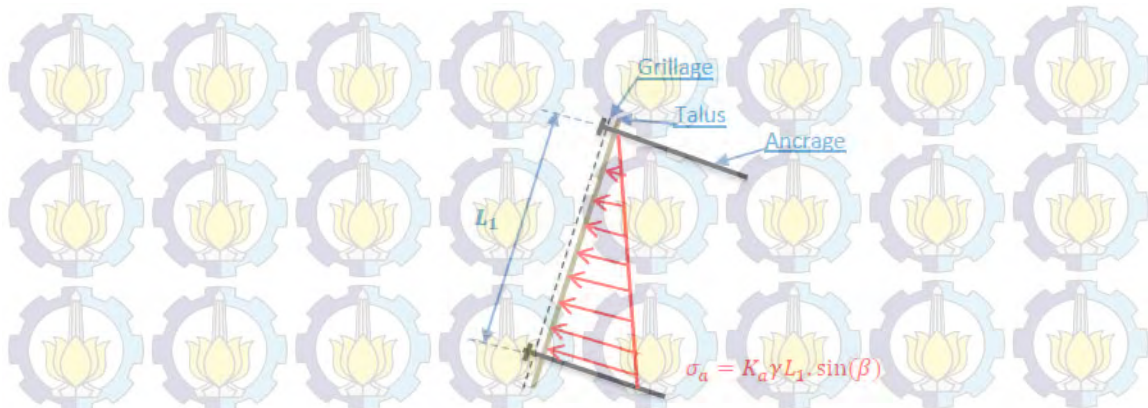


Figure 13. Coupe verticale du talus avec la contrainte non uniforme. (Jeannin, 2013)

Le fait que le talus de calcul soit considéré comme délimité par cette surface (figure 13) considère qu'en haut du talus la poussée est nulle (figure 14), ce qui n'est en réalité pas le cas puisqu'il ne s'agit pas de la limite supérieure du talus mais seulement du maillage d'ancrage. La force est donc considérée comme la résultante d'une poussée uniforme maximale du sol (cf. schéma ci-dessous) et non une moyenne de la contrainte triangulaire, entre les 4 ancres.

Son expression est donc : $F_a = \sigma_a \cdot L_1 \cdot L_2 = K_a \cdot \gamma \cdot L_1^2 \cdot L_2 \cdot \sin \beta$ (5)

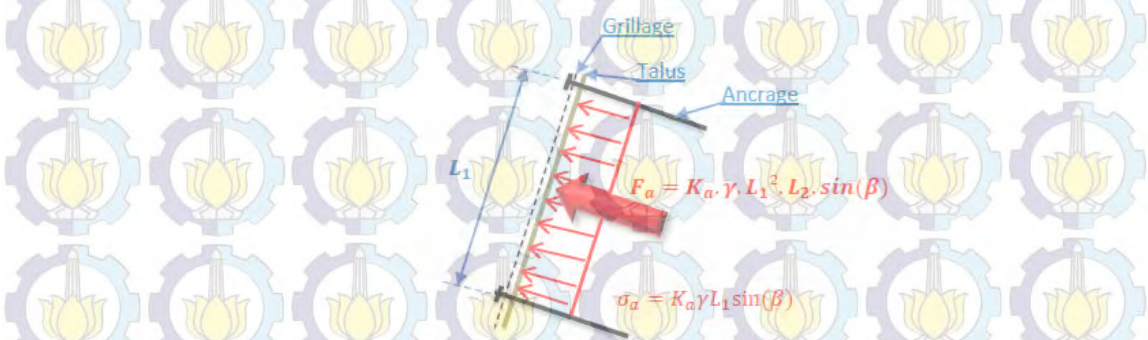


Figure 14. Schéma de la résultante de la poussée du sol sur le grillage. (Jeannin, 2013)

La formule de la force de poussée du sol est donc : $F_{\text{sol}} = \gamma_G \cdot F_a = \gamma_G \cdot K_a \cdot \gamma \cdot L_1^2 \cdot L_2 \cdot \sin \beta$

En vue des essais grandeur nature, l'approche analytique se limite aux configurations qui vont être testées et la surface de grillage câblé dont la résistance est calculée est celle du dispositif d'essai (schéma ci-dessous).

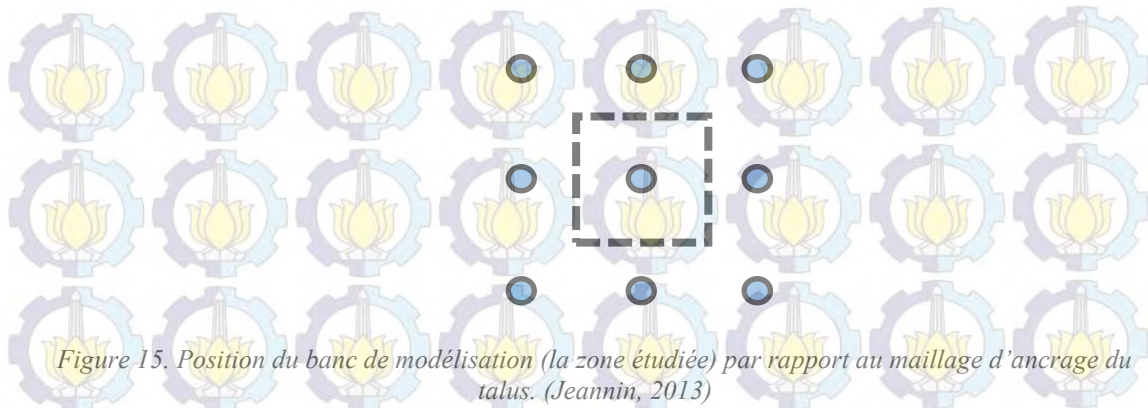


Figure 15. Position du banc de modélisation (la zone étudiée) par rapport au maillage d'ancrage du talus. (Jeannin, 2013)

Les conditions limites en bords de zone sont définies par les tangentes horizontales de la déformée du grillage :

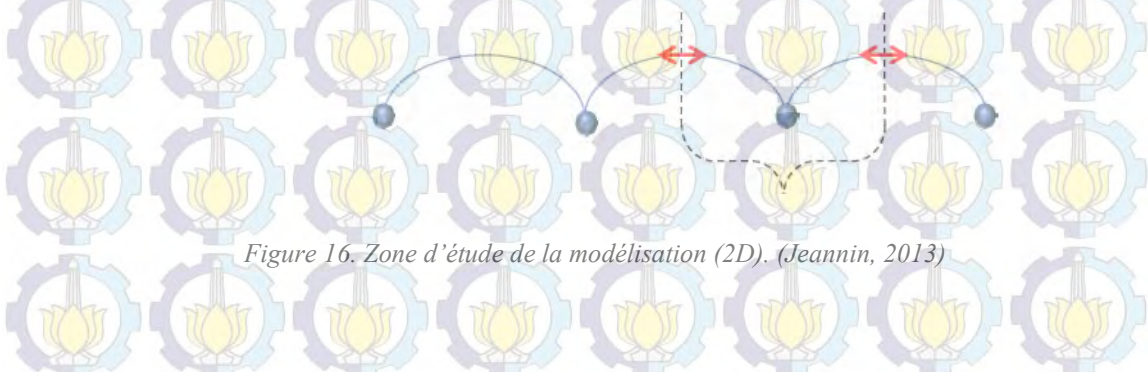


Figure 16. Zone d'étude de la modélisation (2D). (Jeannin, 2013)

Les caractéristiques mécaniques de base d'un treillis métallique hexagonal sont définies par le comportement à la traction de ses sous-structures: le fils unique et le double-torsion. Ces caractéristiques seront utilisées pour définir les relations constitutives du modèle numérique et seront étudiées ci-après.

2.6. Méthodes des éléments finis

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.). ABAQUS est un exemple de progiciel de calcul éléments finis développé par ABAQUS, Inc.

Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- Le solveur ABAQUS/Explicit emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.
- ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour lesdits solveurs.

La méthode de solution explicite est une procédure dynamique véritable origine développé pour modéliser les événements d'impact à grande vitesse dans laquelle l'inertie joue un rôle prépondérant dans la solution. Hors d'équilibre des forces se propagent comme des ondes de contrainte entre les éléments voisins tout en résolvant un état d'équilibre dynamique. Depuis l'augmentation minimum de temps stable est généralement assez faible, la plupart des problèmes nécessitent un grand nombre d'incréments [ABAQUS Documentation].

2.6.1. Analyse quasi-statique

Une analyse quasi-statique stress dans Abaqus / Standard:

- est utilisée pour analyser les problèmes de réponse de matériel en fonction du temps (fluage, gonflement, viscoélasticité, et deux couches viscoplasticité);
- est utilisé lorsque les effets d'inertie peuvent être négligés; et
- peut-être linéaire ou non linéaire.

Pour vous donner une compréhension plus intuitive des différences entre un processus lent, quasi-statique cas de chargement et un cas de charge rapide, nous utilisons l'analogie illustré dans la figure 18 :

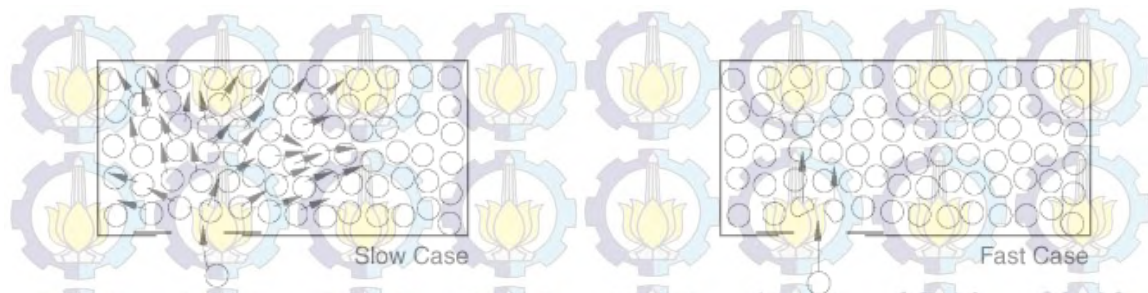


Figure 17. Analogie pour les cas de charge lente et rapide.

La figure montre deux cas d'un ascenseur plein de passagers. Dans le cas lent, la porte s'ouvre et vous marchez. Pour faire de la place, les occupants adjacents à la porte lentement pousser leurs voisins, qui poussent leurs voisins, et ainsi de suite. Cette perturbation traverse l'ascenseur jusqu'à ce que les gens à côté des murs indiquent qu'ils ne peuvent pas se déplacer. Une série de vagues passent par l'ascenseur que tout le monde a atteint un nouveau point d'équilibre. Si vous augmentez votre vitesse légèrement, vous pousser vos voisins avec plus de force qu'auparavant, mais à la fin tout le monde va se retrouver dans la même position que dans le cas lent [ABAQUS Documentation].

2.6.2. Analyse dynamique

Abaqus offre plusieurs méthodes pour effectuer une analyse dynamique des problèmes dans lesquels les effets d'inertie sont pris en considération. L'intégration directe du système doit être utilisé lorsque la réponse dynamique non linéaire est à l'étude. Intégration directe implicite est fourni dans Abaqus / Standard; intégration directe explicite est fourni dans Abaqus / Explicite. Méthodes modales sont généralement choisis pour analyse linéaire parce que dans la dynamique d'intégration directe des équations mondiales de mouvement du système doivent être intégrées dans le temps, ce qui rend les méthodes d'intégration directe beaucoup plus cher que les méthodes modales. Méthodes de sous-espace sont prévues dans Abaqus / Standard et offrent des approches rentables à l'analyse des systèmes qui sont légèrement non linéaire.

2.6.3. Simulation numérique

La solution pour la simulation des essais de filet implique l'étude simultanée de deux non-linéarités: (1) la non-linéarité matériau (comportement plastique dans ce cas) et (2) non-linéarité géométrique de filet en grands déplacements. (Fresno, 2008)

2.6.3.1. Plasticité

Il y a beaucoup de matériaux présentent un comportement plastique idéal dans lequel une limite d'élasticité de limitation, σ_y , qui existe dans les tensions sont indéterminées. Pour toutes les contraintes ci-dessous comme le rendement, un linéaire (ou non linéaire) relation d'élasticité est supposée. Un autre raffinement de ce modèle est l'un durcissement / adoucissement matière plastique dans laquelle la limite d'élasticité dépend de certains paramètres κ (tels que la déformation plastique ϵ_p). Ce type de plasticité est d'un grand intérêt pour cette étude et de théorie a été développée pour représenter cette plasticité.

Il est généralement postulé, comme un fait expérimental, que le rendement peut se produire que si les contraintes σ satisfont au critère de rendement général (Del Coz Díaz et al, 2002.):

$$F(\sigma, \kappa) = 0 \quad (5)$$

où κ est un paramètre "durcissement". Cette condition d'écoulement peut être visualisé comme une surface à n-dimensions de l'espace avec le stress de la position de la surface F (surface de rendement) en fonction de la valeur instantanée du paramètre d'état κ .

2.6.3.2. Grands déplacements

Dans de nombreux problèmes, il a été supposé implicitement que les déplacements et les déformations dans la structure développées sont faibles. En termes pratiques, cela signifie que la géométrie des éléments reste pratiquement inchangé au cours du processus de chargement et de premier ordre, infinitésimales, des approximations linéaires de déformation peut être utilisé.

Dans de nombreux cas, très grands déplacements peuvent se produire sans provoquer de grandes déformations. Typiquement dans ce contexte est le problème

classique de la 'elastica' dont un exemple est un ressort de montre. Que les déplacements (ou tensions) soient grandes ou petites, les conditions d'équilibre entre les «forces» internes et externes doivent être satisfaites. Ainsi, si les déplacements sont prescrits de la manière usuelle par un nombre fini de paramètres nodaux a , nous pouvons obtenir les équations d'équilibre nécessaires en utilisant le principe de travail virtuel (Brenner et Scott, 2002):

$$\Psi(\vec{a}) = \int_V \bar{B}^T \vec{\sigma} dV - \vec{f} = 0$$

Où Ψ représente de la somme des forces internes et externes généralisées, et dans laquelle B est défini à partir de la définition de déformation \mathcal{E} comme:

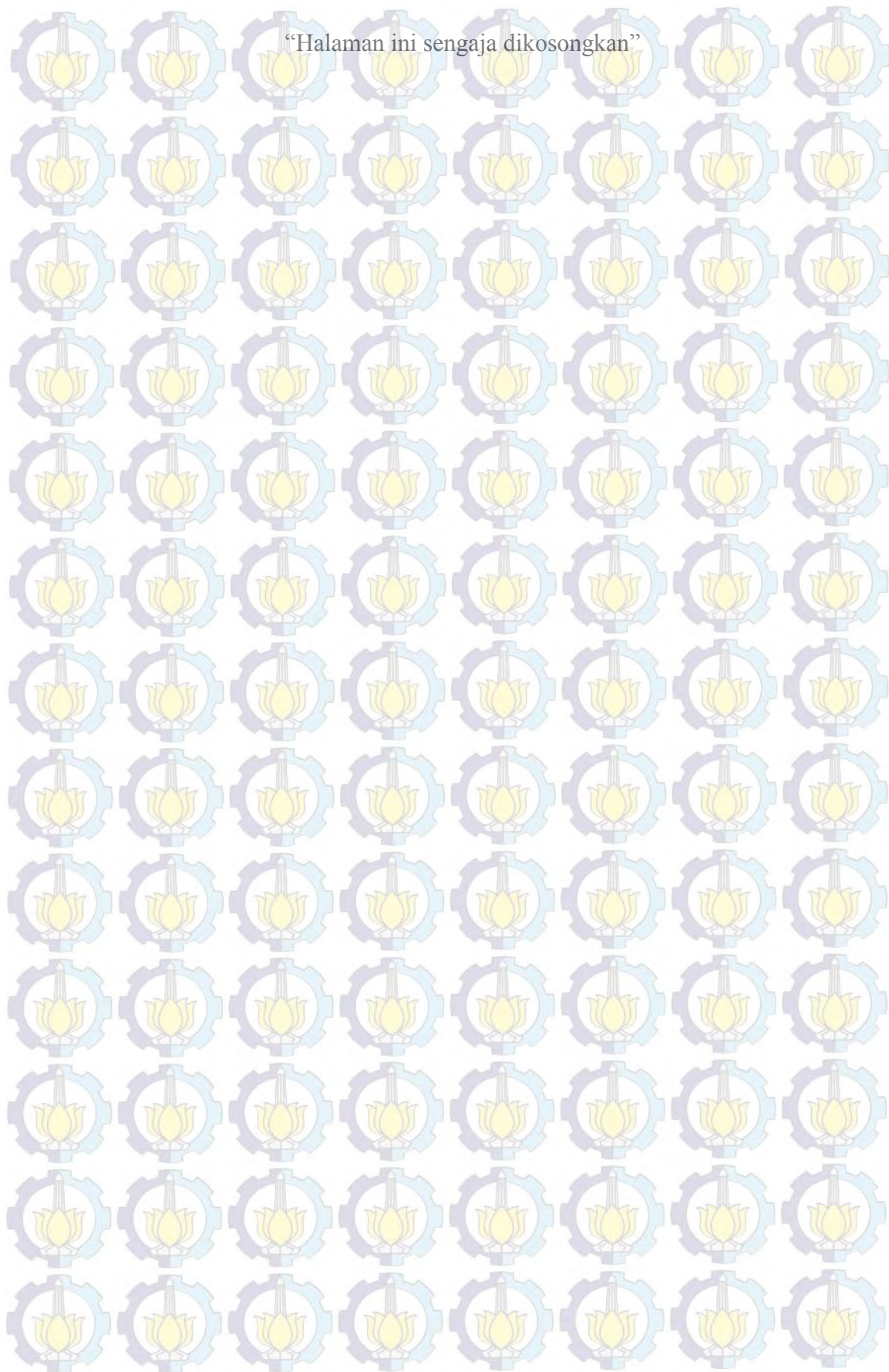
$$d\vec{\mathcal{E}} = \bar{B} d\vec{a}.$$

Le suffixe de bar a été ajouté afin que, si les déplacements sont grandes, les tensions dépendent de déplacement non linéaire, et le B de la matrice est maintenant dépendant d'un a . Nous voyons qu'il peut être facilement réécrit [Zienkiewicz et Taylor, 1991]:

$$\bar{B} = B_0 + B_L(\vec{a}) \quad (6)$$

où B_0 est la même matrice que dans l'analyse linéaire infinitésimale de contrainte, et seulement B_L dépend du déplacement. En général, le B_L ne se trouve être une fonction linéaire de ces déplacements.

Il est clair que la solution de l'équation (6) devront être abordés de façon itérative.



CHAPITRE 3 : INVESTIGATION DES ESSAIS

3.1. Introduction

Ces essais qui a été réalisés expérimentalement par Francis Jeannin, m'ont permis de reproduire dans une modélisation numérique. Les essais expérimentaux consistaient 6 configurations des grillages avec la taille de fil et la disposition des différents renforts de câbles. Voici les configurations des grillages concernant sur l'expérimentation:

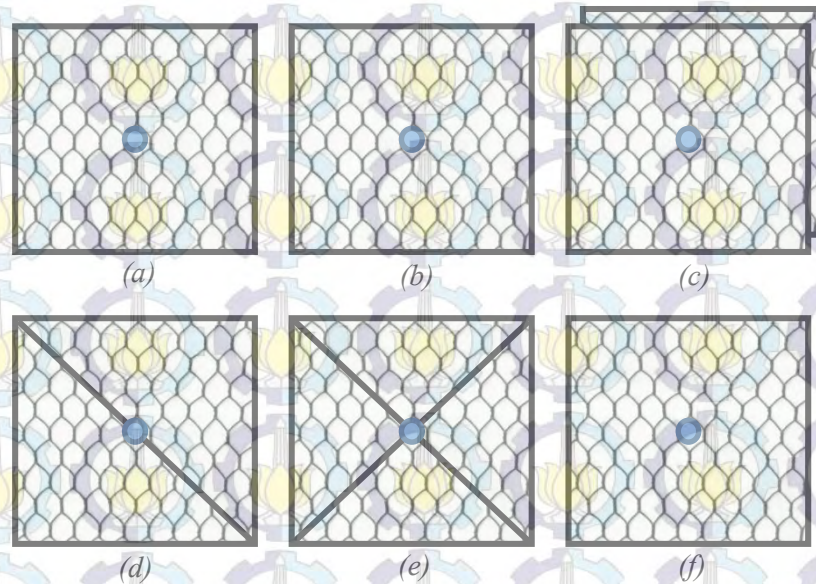


Figure 19. Configuration des grillages: (a) 60x80, (b) 100x120, (c) double grillage, (d) 1 câble, (e) 2 câbles, (f) TECCO.

3.2. Présentation du dispositif

Les essais en modèle réduit ont montré que la zone sensible de grillage ancré plaqué se situe au niveau des ancrages. Il est trop onéreux de construire un dispositif à échelle 1 de 6x6m. En utilisant les symétries le dispositif à échelle 1 teste la zone de 3x3m suivante (Jeannin, 2013) :

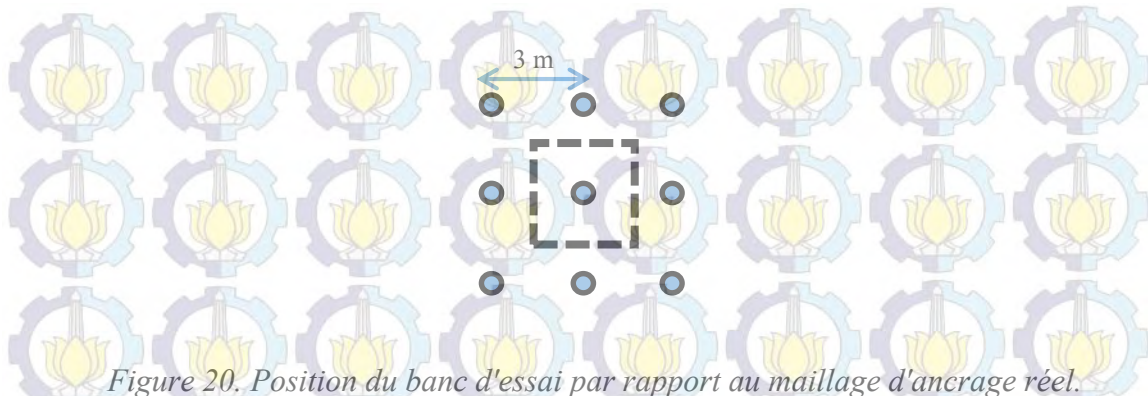


Figure 20. Position du banc d'essai par rapport au maillage d'ancrage réel. (Jeannin, 2013)

Le bac est constitué de profilés HEB fixés entre eux à chaque angle par une barre les traversant et boulonnée des deux côtés. L'intérieur du bac contient deux citernes d'eau. Ces citernes vont appliquer une contrainte uniforme sur le grillage, une fois mises sous pression par les vérins (cf. figure ci-dessous).

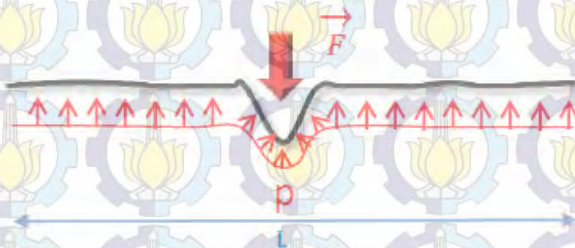


Figure 21. Schéma de la contrainte appliquée sur le grillage par les citernes provoquée par la force des vérins. (Jeannin, 2013)

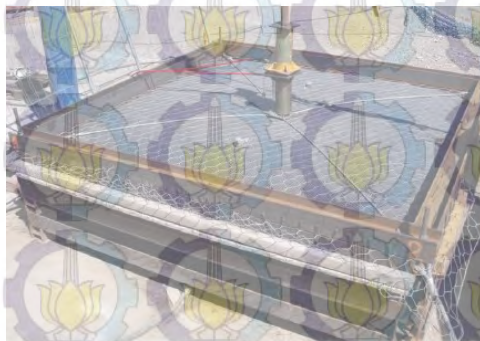


Figure 22. Dispositif d'essai terminé avec la configuration à 2 câbles installée. (Jeannin, 2013)



Figure 23. Citernes placées dans le bac et remplies d'eau. (Jeannin, 2013)

Les vérins appliquent une force F sur une plaque d'ancrage de largeur l . Celle-ci exerce une pression $f = F/l^2$ sur le grillage. Sous la pression de la plaque, le grillage se déforme localement et la citerne d'eau exerce alors une pression uniforme sur toute la surface du grillage (cf. schéma ci-dessus). On a donc la relation suivante : $p \cdot L^2 = f \cdot l^2$

Cette pression peut être assimilée à une pression uniforme horizontale et donc à une force résultante de réaction comme le montre le schéma ci-dessous.

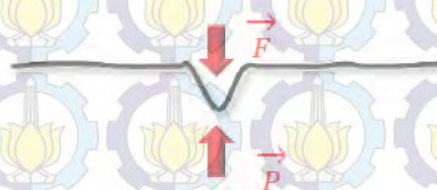


Figure 24. Schéma de la force P résultante équivalente des citernes sur le grillage sous l'effet de la force des vérins..

En résumé, la première équation est :

$$\vec{F} = -\vec{P}$$

D'une manière générale, voici les explications par rapport des essais [Jeannin, 2013] :

- La sollicitation des citernes est donc bien semblable à celle du sol
- Le grillage est coincé à chaque côté du bac entre deux profilés en partie supérieure et des armatures le traversant en dehors du bac empêchent son mouvement.
- Les câbles se croisent au centre via une plaque d'ancrage et sont fixés à chaque angle du bac à la barre transversale. Chaque angle du bac est maintenu par un câble ancré à son extrémité pour maintenir les angles du bac droits lors de la mise en contrainte.
- L'ancrage central est constitué d'une tige ancrée dans la dalle de béton. Un vérin sur cet ancrage exerce une force sur la plaque d'ancrage qui met en contrainte le système.

19 essais ont pu être réalisés, Les essais effectués sont les suivants [Jeannin, 2013] :

- 4 essais avec un grillage non câblé 60x80mm
- 4 essais avec un grillage non câblé 100x120mm
- 2 essais avec deux nappes de grillage non câblé 100x120mm
- 3 essais avec 1 câble en diagonal et un grillage 100x120mm
- 3 essais avec deux câbles placés sur les diagonales et un grillage 100x120mm
- 3 essais avec un grillage TECCO® pour pouvoir comparer les résistances dans les mêmes conditions.

3.3. Résultats

Les résultats peuvent être présentés sur le diagramme suivant :

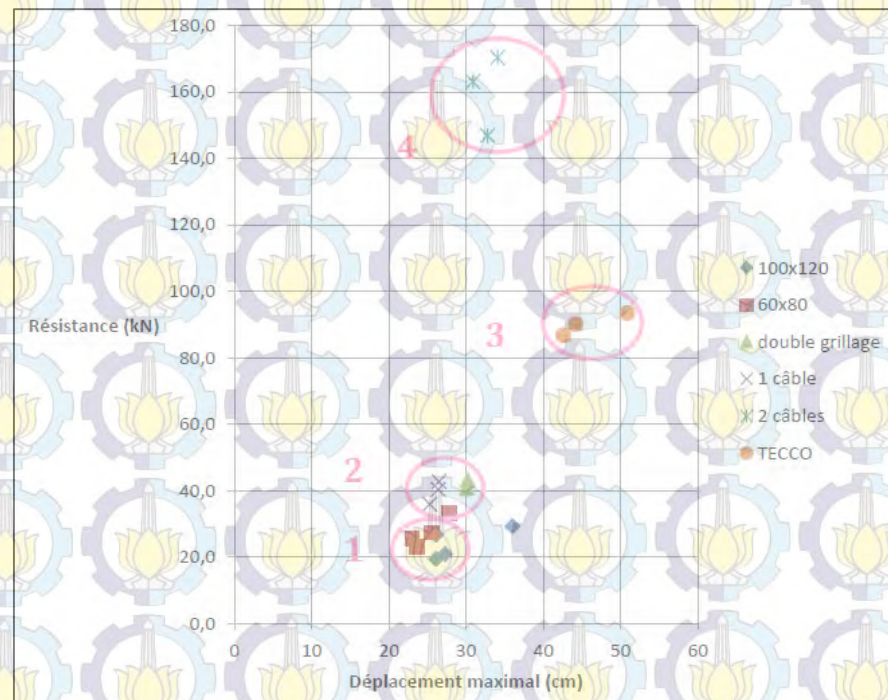


Figure 25. Résultat des essais grandeur nature classés selon les déplacements verticaux le long de l'ancrage central et de la résistance des configurations. (Jeannin, 2013)

Afin de visualiser le confinement assuré par les différentes configurations, il faut considérer les déplacements pour une même sollicitation. La sollicitation de 20 kN a été choisie :

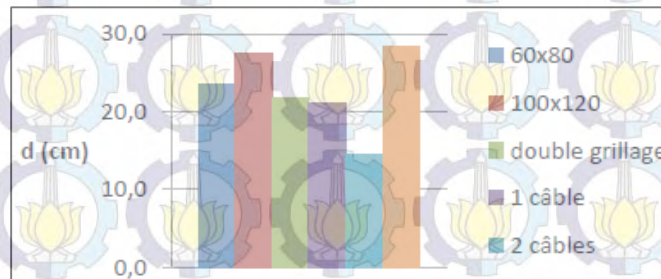


Figure 26. Déplacements moyens de chaque configuration pour une sollicitation de 20 kN. (Jeannin, 2013)

3.4. Conclusion

Voici les courbes de chargement (résistance en fonction du déplacement vertical au droit de l'ancrage central) des essais sur grillage de maille 60x80mm :

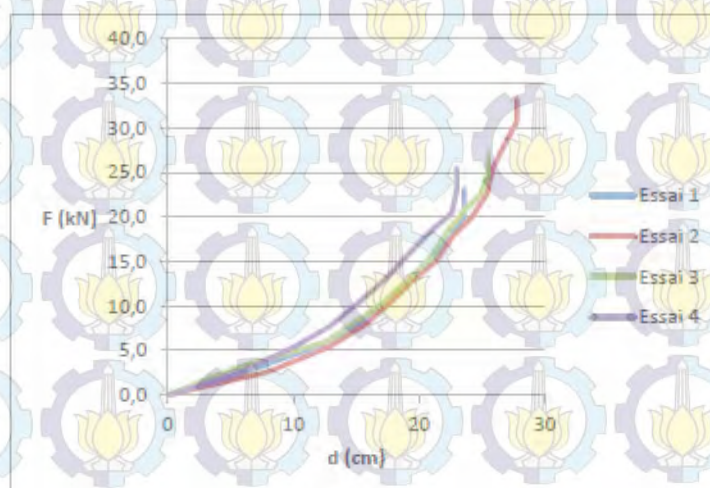


Figure 27. Courbe de chargement des grillages non câble de maille 60x80mm. (Jeannin, 2013)

La répétitivité des essais est à nouveau correcte. Les courbes forment toutes des courbes de type $y = a.x^b$. Il serait intéressant de comparer ces courbes avec celles de membranes de matériau quelconque pour savoir si le comportement d'un grillage est bien celui d'une membrane. Ainsi le comportement de l'ensemble pourrait être mieux anticipé. Pour les configurations avec des câbles, la courbe suit également une forme de type $y = a.x^b$ au début. Quand les câbles entrent en tension et reprennent une partie des efforts, la courbe devient un peu plus linéaire [Jeannin, 2013].

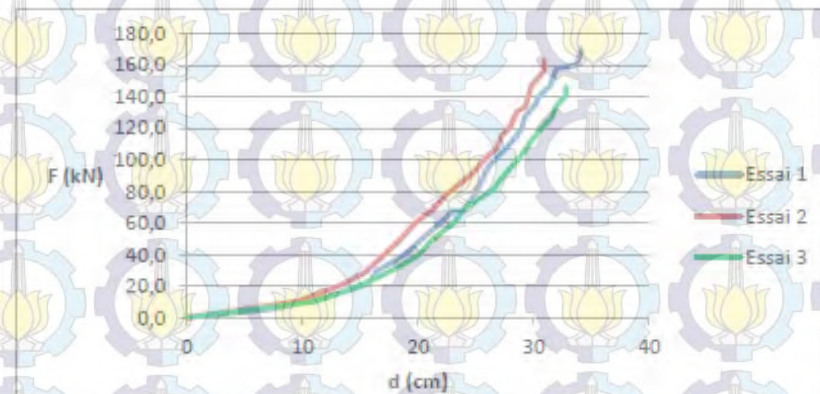


Figure 28. Courbe de chargement des configurations à 2 câbles. (Jeannin, 2013)

CHAPITRE 4 : MODELISATION NUMERIQUE

4.1. Présentation du modèle

Le modèle numérique de la structure est présenté pour démontrer de façon aussi réaliste, aussi simple que possible. Pas tous les éléments des propriétés expérimentales telles que le bac d'eau, les vérins, sont modélisés dans ce cas. Pour les simplifier, on peut discuter les étapes qui seront étudiés ci-dessous.

- Le filet

Le filet est modélisé en hexagonal à double torsion, qui est composée de deux côtés latéraux de fil mutuellement torsadée. On met simplement dans le Méthodes des éléments Finis (MEF) la section sur ce type de fil est doublé qu'un fil unique. Dans ABAQUS, le filet est modélisé comme d'élément en treillis (Truss-T2D2).

Diamètre du fil (mm)	Module d'Young (N/mm ²)	Masse Volumique (tonne/m ³)	Coefficient de Poisson
2.7 mm	68000	2.70×10^{-9}	0.3
3.0 mm	200000	7.85×10^{-9}	0.3

Tableau 4. Propriétés des filets utilisés

- Le câble

Le câble est utilisé dans un type d'acier d'un diamètre de 16 mm avec module d'Young 90000 MPa et la densité de 4.87×10^{-9} tonne/m³. Comme le filet, le câble dans ABAQUS est modélisé comme l'élément treillis (Truss-T2D2).

- Le vérin

Les vérins sont utilisés pour transmettre la force à la surface des grillages en plaque d'acier, soit 20cmx20cm. Dans ce cas modèle MEF, on peut simplement exercer la force directement aux nœuds des grillages correspond par rapport à la surface de la plaque, soit 20cmx20cm.

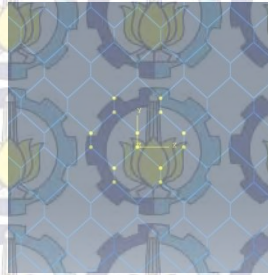


Figure 29. Nœuds au milieu de la surface des grillages où s'applique la force, soit 20cmx20cm

La force qui s'applique à chaque configuration de grillage est basée sur la force maximum qui est noté sur l'essai. Voici la liste de force avec ses configurations :

Configurations	Force maximum (kN)
Grillage non câble 60x80	33.3
Grillage non câble 100x120	29.2
Double grillage	43.1
Grillage avec 1 câble	42.7
Grillage avec 2 câbles	170.3
TECCO	93.4

Tableau 5. Résumé de la force pour la modélisation

Les forces indiquées ci-dessus sont données aux nœuds comme discuté précédemment. Dans la modélisation, il y a 2 étapes de chargement de force. Dans la première étape, la force de pression pousse la membrane vers le haut, elle est égale la force maximum divisé par la section de la membrane. La deuxième étape, la force maximum pousse le grillage vers le bas. Le calcul en ABAQUS utilise la méthode Dynamique/Explicite.

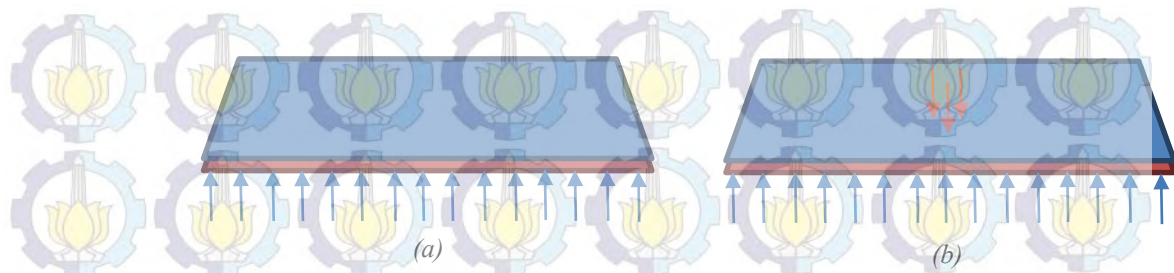


Figure 30. Schéma le chargement : (a) 1^{er} étape : pression en membrane, (b) 2^{ème} force concentrée aux nœuds de grillage

- Le bac

Les citernes d'eau dans le bac vise à fournir une pression sur la surface de grillage. Pour les simplifier en MEF, on peut installer un élément de membrane afin d'appliquer la pression verticale poussant la surface de grillage. Une membrane peut être composée d'un matériau élastique tel que du caoutchouc.

Densité du coussin gonflable	1000 kg/m ³
Module d'Young	3×10^8 N/mm ²
Coefficient de Poisson	0.35
Epaisseur	6.25 mm

Tableau 6. Propriétés de membrane utilisé

- Les conditions aux limites

Tous les bords de la surface des grillages sont considérés comme des appuis triples, les 3 déplacements sont bloqués et les 3 rotations sont libres.

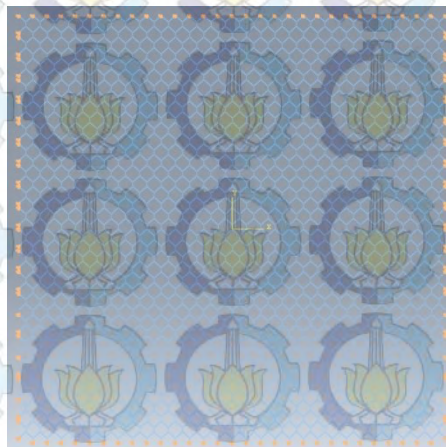


Figure 31. Conditions aux limites du modèle

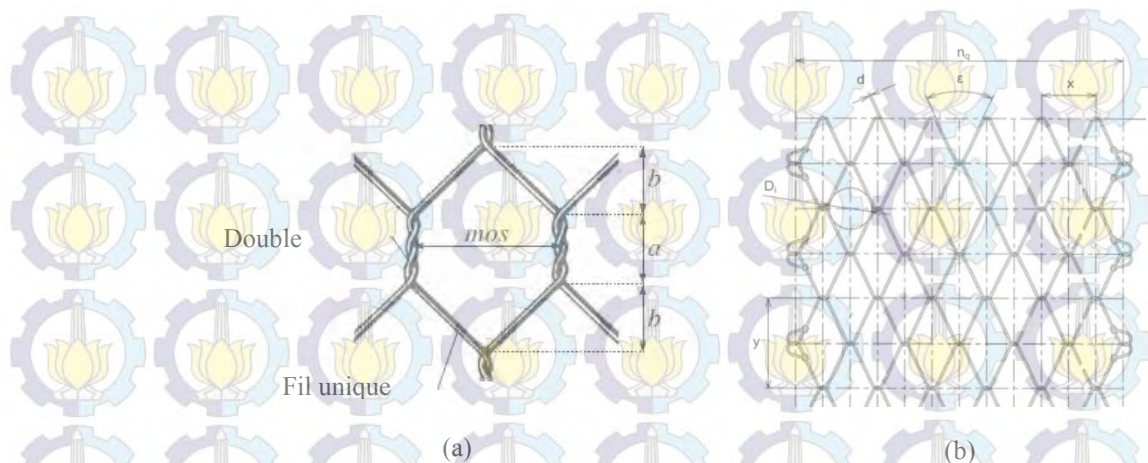


Figure 32. La taille détaillé ; (a) pour grillage 60x80, $a=20\text{mm}$ $b=30\text{mm}$, $mos=60\text{mm}$; pour grillage 100x120, $a=30\text{mm}$ $b=45\text{mm}$, $mos=100\text{mm}$, et (b) pour grillage TECCO, $x=83\text{mm}$ $y=137\text{mm}$

• Modéliser le contact

Dans chaque configuration expérimentale de structure de grillage, il y a 3 composants importants à compiler, ils sont : le grillage, le coussin de membrane, et le câble. Pour les assembler en ABAQUS, il faut gérer le contact entre chaque élément. Dans ce cas, je choisis le comportement tangentiel sans frottement. Et pour le comportement normal, la relation entre pression et overclosure, je le modélise en contact dur (Hard Contact).

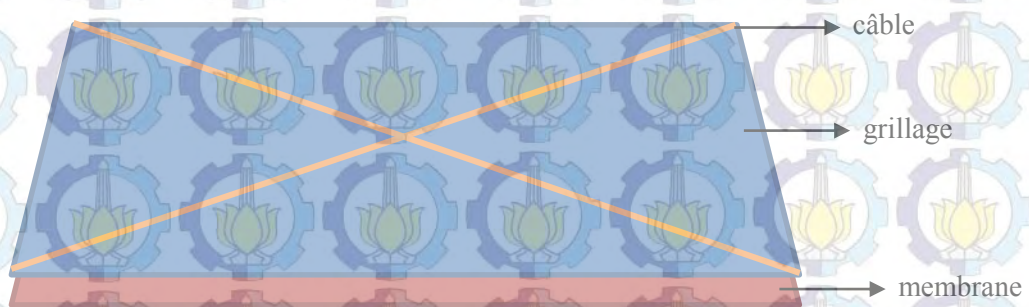


Figure 33. Schéma le contact du modèle

- Loi de comportement utilisé

Après avoir faire plusieurs bibliographies, on modélise le grillage et le câble sous condition élasto-plastique avec la courbe contrainte-déformation suivante :

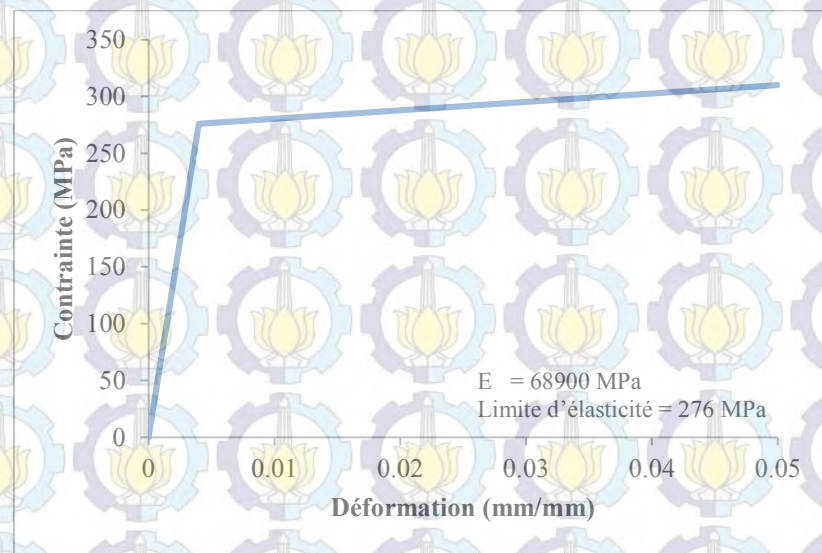


Figure 34. Courbe de comportement du matériau grillage utilisé. (Thoeni, 2012)

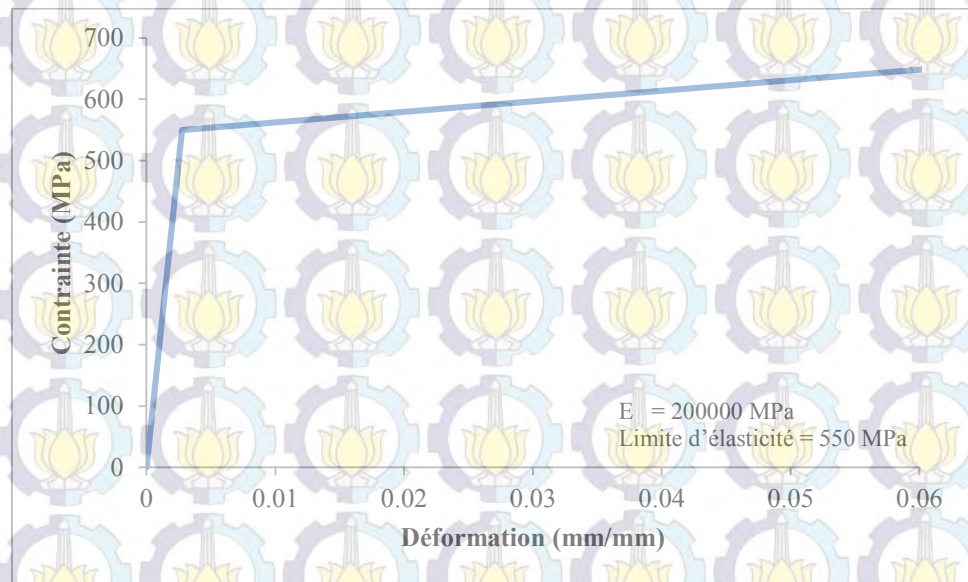


Figure 35. Courbe de comportement du câble utilisé. (Fresno, 2013)

Les valeurs (contrainte et déformation) dans ces courbes est prennent en compte dans la modélisation par ABAQUS.

4.2. Validation numérique

Avant de faire une modélisation numérique, Je fais des calculs théoriques sur un câble soumis à un chargement ponctuel pour que analyse numérique soit valide. Après cela, je compare les résultats des calculs numériques utilisant l'analyse ABAQUS. Voici l'exemple:

$$Q = F = K_a \cdot \gamma \cdot L_1^2 \cdot L_2 \cdot \sin(\beta)$$

$$= 0,33 \times 1600 \text{ kg/m}^3 \times 3^2 \times 1 \times 0,939$$

$$= 4462 \text{ kg}$$

$$= 43733 \text{ N}$$

$$A = 5.72 \text{ mm}^2$$

$$E_{\text{cable}} = 200,000 \text{ N/mm}^2$$

$$L = 3000 \text{ mm}$$

Calculer Δ et σ

Calculer Δ

$$8 \left(\frac{\Delta}{L} \right)^3 + 4 \frac{P}{E_c A} \left(\frac{\Delta}{L} \right) = \frac{Q}{E_c A}$$

$$8 \left(\frac{\Delta}{3000} \right)^3 + 0 = \frac{43733}{200000 \times 5.72}$$

$$8 \left(\frac{\Delta}{3000} \right)^3 = 0.038$$

$$\Delta = \sqrt[3]{\frac{0.0038 \cdot 3000^3}{8}}$$

$$\Delta = 505 \text{ mm}$$

Le résultat numérique : (U2= 536.7 mm)



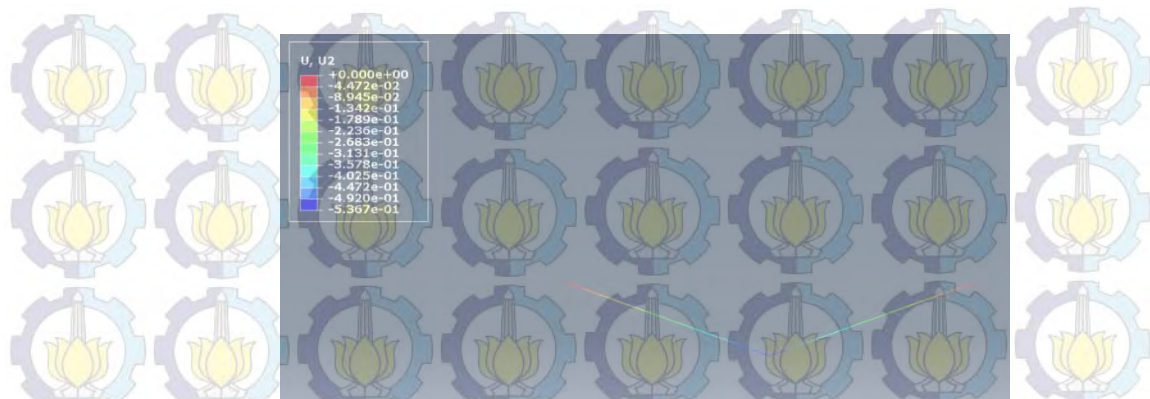


Figure 36. Iso-valeur U2 (sens vertical)

Calculer σ

$$A = \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) = \left(\frac{\pi 2.7^2}{4} \right) = 5.72 \text{ mm}^2$$

On a $\Delta = 505 \text{ mm}$, alors : $\arctan \alpha = 505/1500$

$$= 0.33667$$

$$\alpha = 18.607^\circ$$

Donc : $\tan 18.607^\circ = \frac{21866.5}{R_H}$, $R_H = 64949 \text{ N}$

$R_H = 61140 \text{ N}$ (numérique)

$$\sigma = \left(\frac{N}{A_{\text{cable}}} \right) = \left(\frac{64949}{5.72} \right) = 11354 \text{ N/mm}^2$$

Le résultat numérique : $(S_{\text{max}} = 1.205 \times 10^{10} \text{ N/m}^2) = 12050 \text{ N/mm}^2$

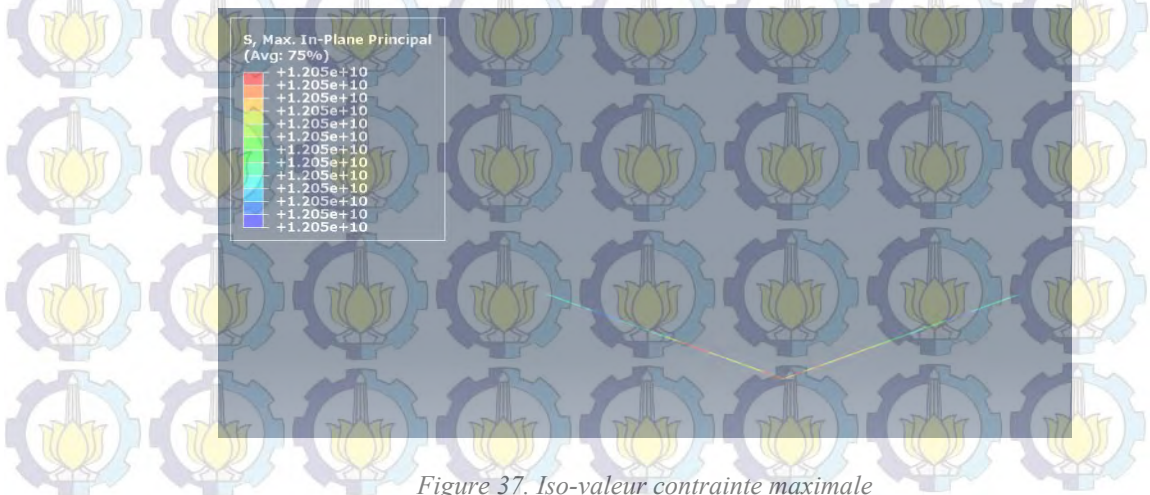
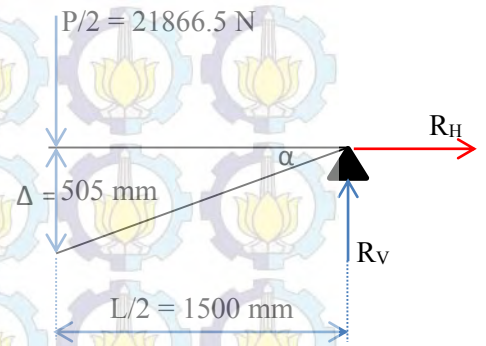


Figure 37. Iso-valeur contrainte maximale

Les calculs analytiques et numériques, montrent que les résultats sont très proches. On conclut qu'ils peuvent être utilisés pour analyser le modèle à échelle 1.

4.3. Calcul de la fréquence

Le calcul de fréquence est effectuées dans ABAQUS en sélectionnant l'étape nommé « *Frequency* ». On choisit la valeur d'Eigen demandé, $n = 10$, et donc on obtient les valeurs de fréquences pour la configuration du grillage 100x120 suivantes:

n	Valeur d'Eigen propre	Fréquence (cycle/temps)
1	0.211	0.073
2	1.068	0.164
3	1.505	0.195
4	3.379	0.292
5	3.882	0.313
6	6.212	0.396
7	7.886	0.446
8	9.7857	0.497
9	10.725	0.521
10	17.100	0.658

Tableau 7. Résultats de la norme de la fréquence

Il faut comprendre que la période calculée à partir de l'analyse modale permet d'estimer le Step Time. C'est à dire qu'on peut choisir des valeurs de temps autour de cette valeur. On a choisi la valeur plus la petite pour l'estimer, soit, $T=1/f = 1/0.658 = 1.522$ s. Cette valeur est utilisée dans le paramètre du chargement lisse (Smoothloading) pour que l'analyse soit considéré comme l'analyse propre de quasi-statique.

4.4. Etude de convergence du maillage

Traditionnellement, lors des simulations éléments finis, un maillage raffiné fournit des résultats plus précis. D'un autre côté, plus le maillage est important, plus le temps de calcul est long. L'idée de cette discussion est d'exposer une méthode permettant d'avoir un bon compromis entre le temps de calcul et une précision satisfaisante, cela à travers une étude de **convergence de maillage**. [Benchissou, 2014]

Voici les principales étapes dont nous parlons ici afin de proposer une convergence du maillage manuelle :

- Création d'un maillage en utilisant un nombre raisonnable d'éléments, puis analyser le modèle.
- Recréer le maillage en augmentant la densité de maillage, le recalculer, comparer les résultats avec le premier calcul.
- Continuer à augmenter la densité de maillage, ré-analyser le modèle ; puis vérifier que les résultats convergent de manière satisfaisante.

Pour déterminer si les résultats ont convergé de manière satisfaisante et avec précision, voici une des manières de procéder:

- Afficher la **von Mises Precision** / la **configuration déformée de la structure**, qui affiche une représentation visuelle des différentes valeurs de la contrainte / la flèche d'un élément à un autre. Cet affichage peut être utilisé pour déterminer les effets du maillage sur la précision et une indication sur les endroits de la pièce nécessitant un raffinement local (sous certaines réserves).
- La manière la plus facile pour ces raffinements est de définir près de ces endroits des points de raffinement, qui sont disponibles aussi bien pour les maillages 2-D que 3-D.
- Ces points peuvent donc être utilisés pour améliorer la précision et la qualité du maillage et la précision dans les endroits jugés stratégiques par l'utilisateur.
- Il est aussi intéressant d'afficher les résultats non lissés des contraintes afin de localiser plus précisément encore les sauts de résultats d'un élément à un autre.

Lorsqu'on compare un modèle de maillage avec un autre, il faut vérifier les valeurs de résultats au même endroit sur les deux modèles précédent (par exemple, milieu d'un côté, d'un arc ou centre d'une surface). Afin d'étudier ce cas, on peut utiliser par exemple un modèle de grillage 100x120 sans câble pour analyser les effets de maillage en grillage. On prend l'épaisseur de la membrane coussin gonflable = 6.25 mm et le divise en suivant un certain type maillage :

Voici l'effet de maillage sur le grillage:

Type de maillage	Déplacement (mm)
1 sous élément à chaque élément (dont 3580 éléments)	29.144
2 sous élément à chaque élément (dont 7160 éléments)	24.940
chaque 15 mm (dont 11960 éléments)	24.898
chaque 10 mm (dont 20340 éléments)	25.791
chaque 7.5 mm (dont 26320 éléments)	25.740

Tableau 8. Résultats de la norme du déplacement à l'effet de maillage en grillage

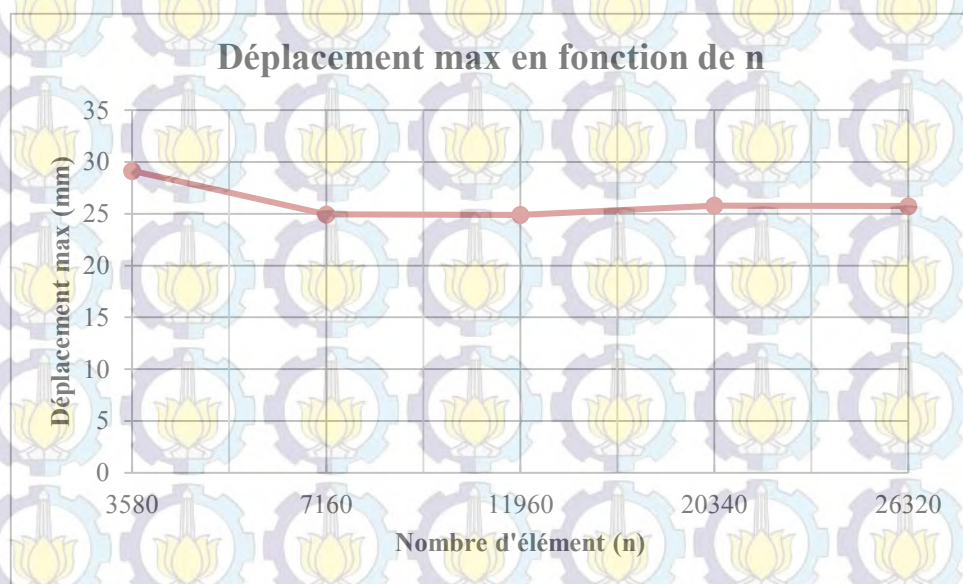


Figure 38. Graphe du déplacement max en fonction de nombre d'élément

Conclusion: Nous pouvons utiliser le type de maillage de grillage chaque 10 mm (dont 20340 éléments) parce que la différence calculée avant et

après ce type de maillage ne sont pas trop différents, soit moins de 5%.
Donc, il est convergence.

A titre d'illustration, voici un exemple de traitement l'effet maillage en membrane :

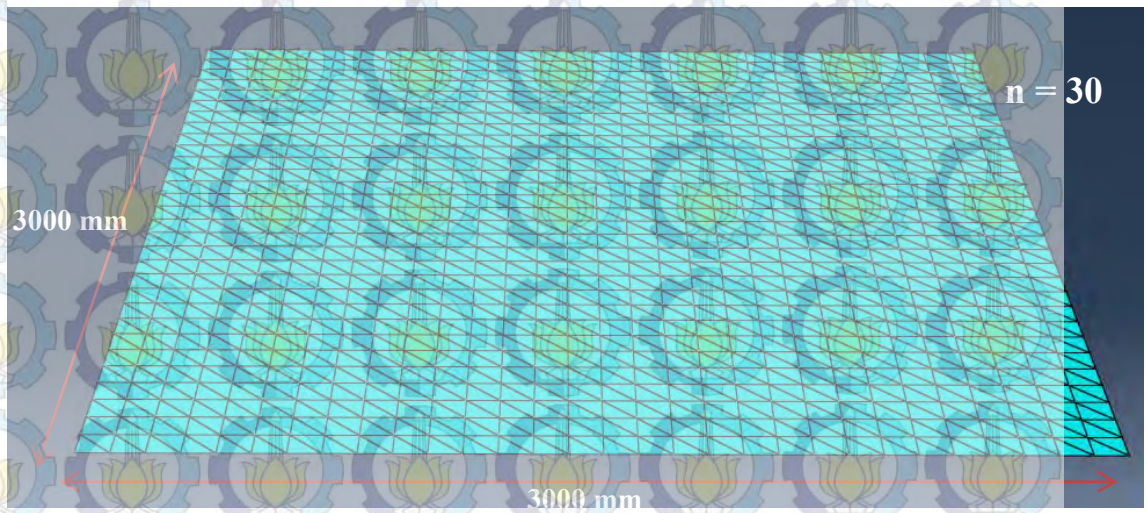


Figure 39. Modèle de membrane avec un maillage 30 x 30

Sur la figure ci-dessus, une membrane d'coussin gonflable (3000 x 3000 x 6 mm) bloquée sur ses 4 bords est soumise à une force concentrée égale à 29. kN en grillage au-dessus, normale aux faces des éléments. Une étude de convergence de maillage est réalisée avec un maillage carré $n \times n$ en prenant $n = 10, 20, 30, 50$ et 60 éléments M3D3.

n	Déplacement (mm)
10	23.41
20	24.68
30	24.64
50	24.94
60	24.44

Tableau 9. Résultats de la norme du déplacement en membrane sous l'effet de maillage en membrane

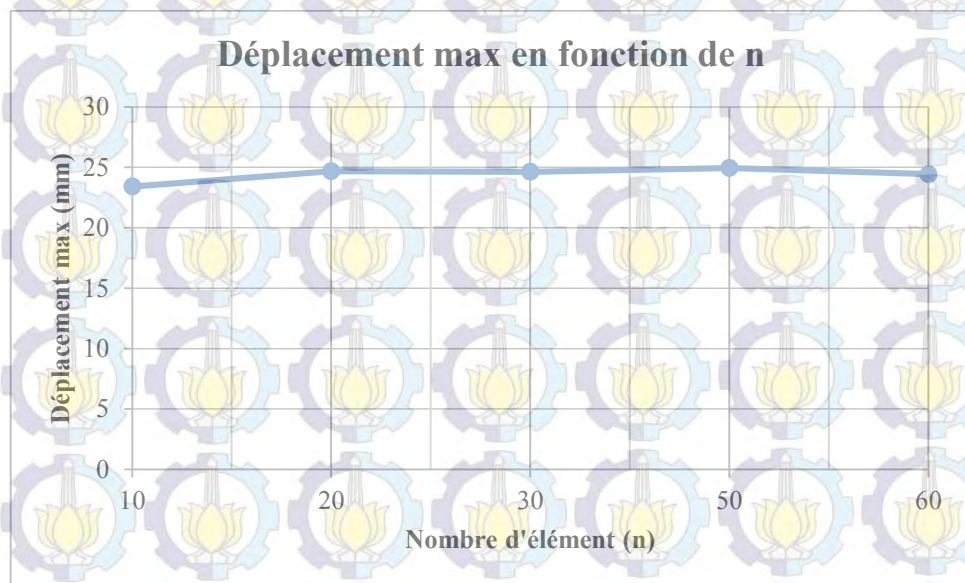


Figure 40. Graphe déplacement max en fonction de nombre de l'élément

Conclusion: Nous pouvons utiliser le type de maillage de membrane avec $n = 50$ éléments, parce que la différence calculée avant et après ce type de maillage ne sont pas trop différents, soit moins de 5%.

Il est intéressant aussi d'analyser l'effet de maillage par rapport la valeur de Von Mises stress. Voici le résultat :

n	Von Mises Stress (N/mm ²)
10	1.278×10^1
20	1.232×10^1
30	1.354×10^1
50	1.508×10^1
60	1.539×10^1

Tableau 10. Résultats de la norme de la contrainte en membrane à l'effet de maillage en membrane

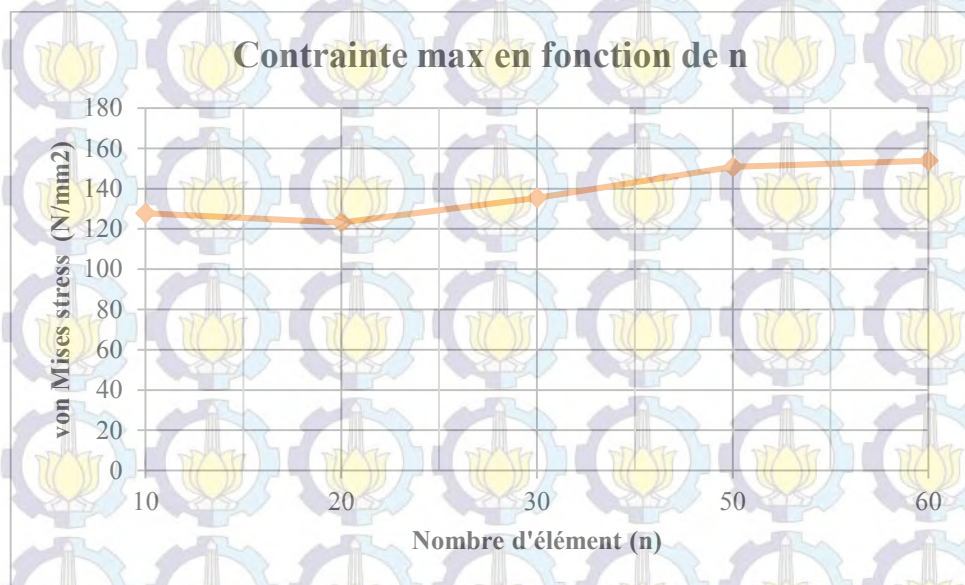


Figure 41. Graphe contrainte max en fonction de nombre de l'élément

4.5 Modélisation quasi-statique par la méthode Explicite

Afin de déterminer si la solution est quasi-statique ou non, il faut comparer l'énergie cinétique et l'énergie interne tout au long du processus. Cette solution peut être obtenue avec un processus quasi-statique, l'énergie cinétique ne devrait pas être supérieure à un certain pourcentage de son énergie interne. Surtout dans le cas où on s'intéresse à la contrainte élastique et pour plus de précision, l'énergie cinétique doit absolument être inférieure.

4.5.1. Energies interne-cinétique

Pour une solution qui est réalisée par un processus quasi-statique, nous avons besoin d'une relation entre l'énergie interne et l'énergie cinétique afin de déterminer si la solution est quasi-statique ou non. En comparant les énergies pour une solution quasi-statique, l'énergie cinétique doit être très inférieure que l'énergie interne surtout quand nous nous intéressons à la contrainte élastique.

Dans cette modélisation, on utilise un chargement lisse (Smooth Loading) pour produire un résultat lisse ; si le chargement est lisse mais les résultats d'énergie sont oscillatoires, les résultats peuvent être inadéquats. Les Figures 40-45 représentent cinq configurations de grillages différents. En comparant les

résultats des deux problèmes, les valeurs d'énergie interne sont plus supérieures que celles d'énergie cinétique, c'est bien claire que cette modélisation est quasi-statique en observant le rapport d'énergie cinétique et l'énergie interne.

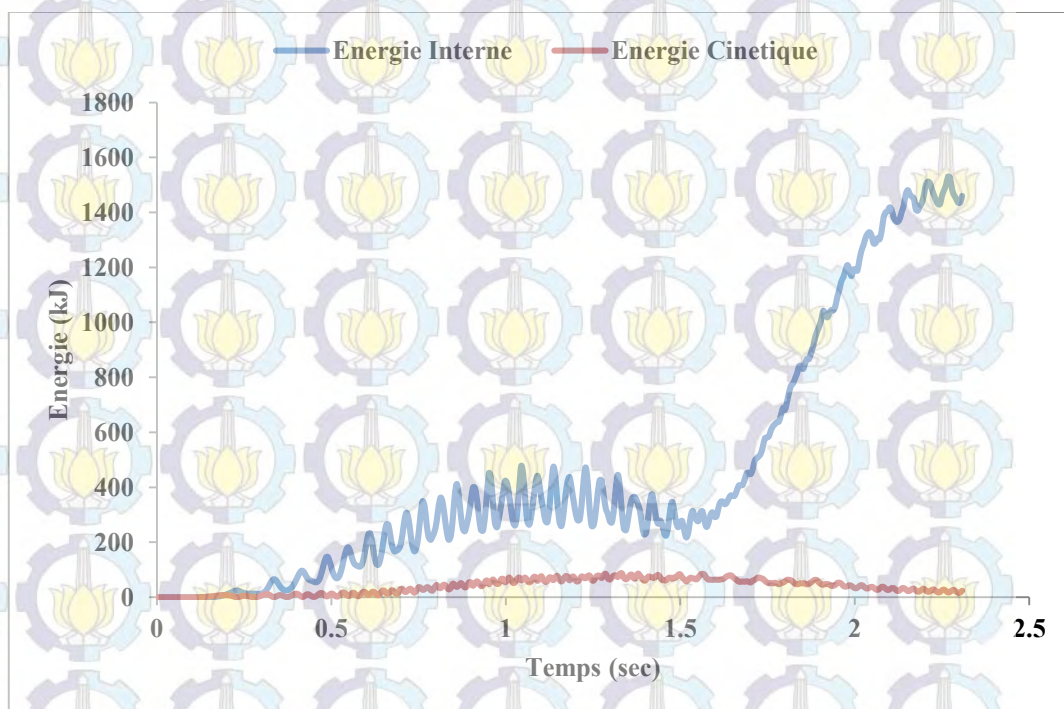


Figure 42. Energie interne-cinétique pour les grillages 60x80 mm sans câble

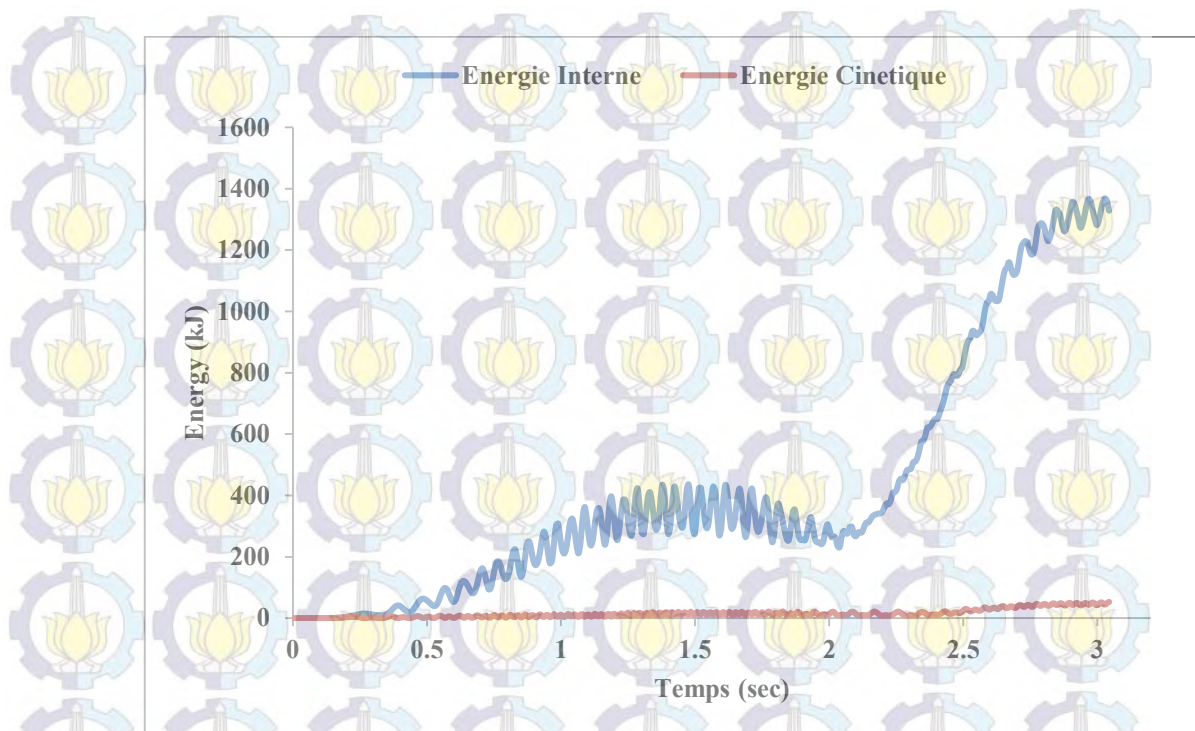


Figure 43. Energie interne-cinétique pour les grillages 100x120 mm sans câble

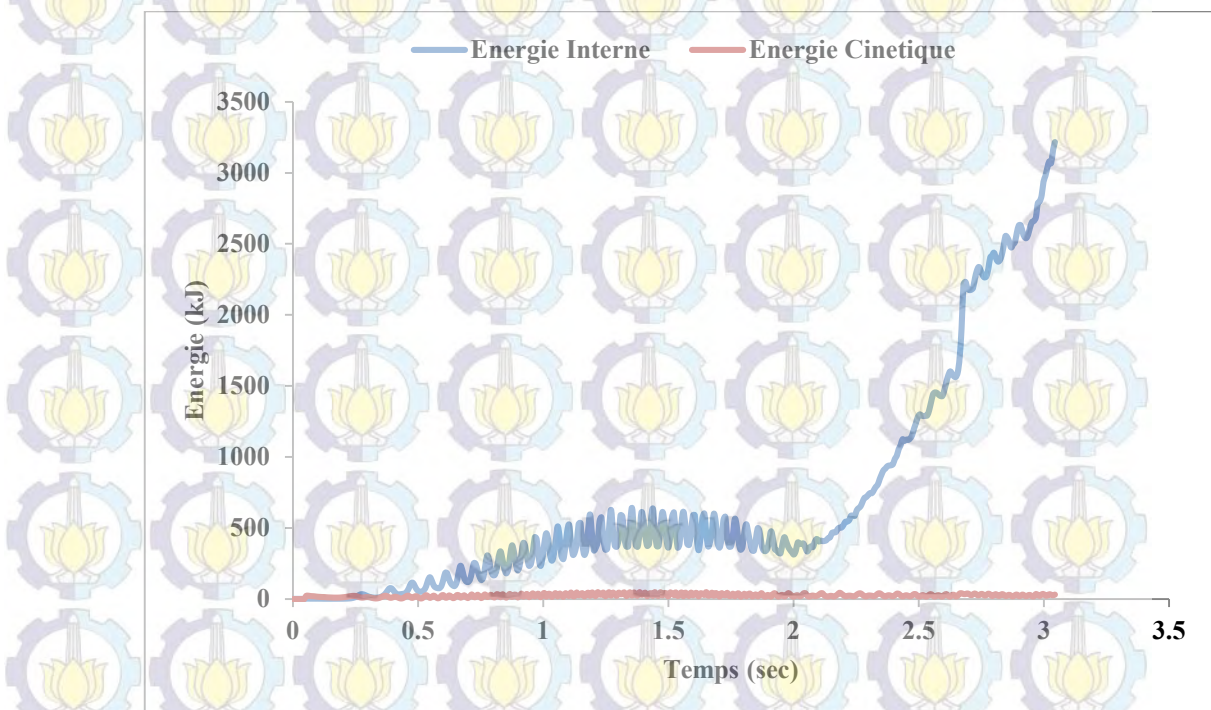


Figure 44. Energie interne-cinétique pour les doubles grillages 100x120 mm sans câble

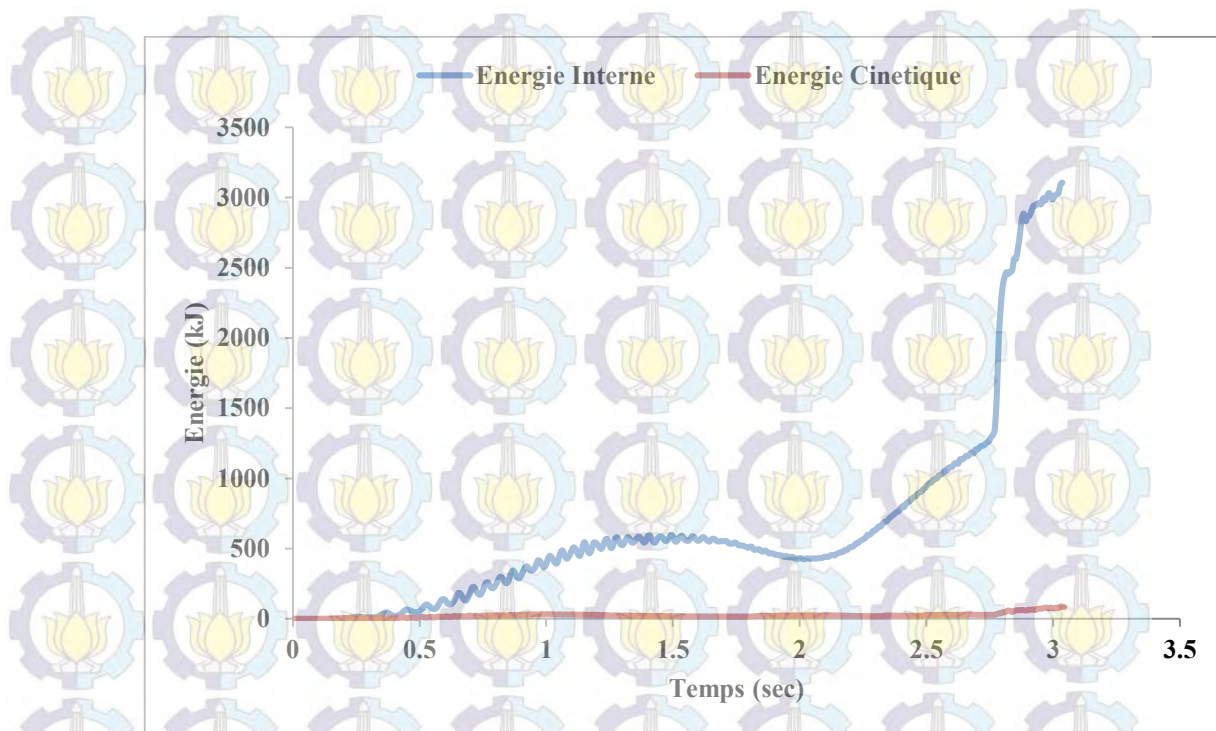


Figure 45. Energie interne-cinétique pour les grillages 100x120 mm avec 1 câble

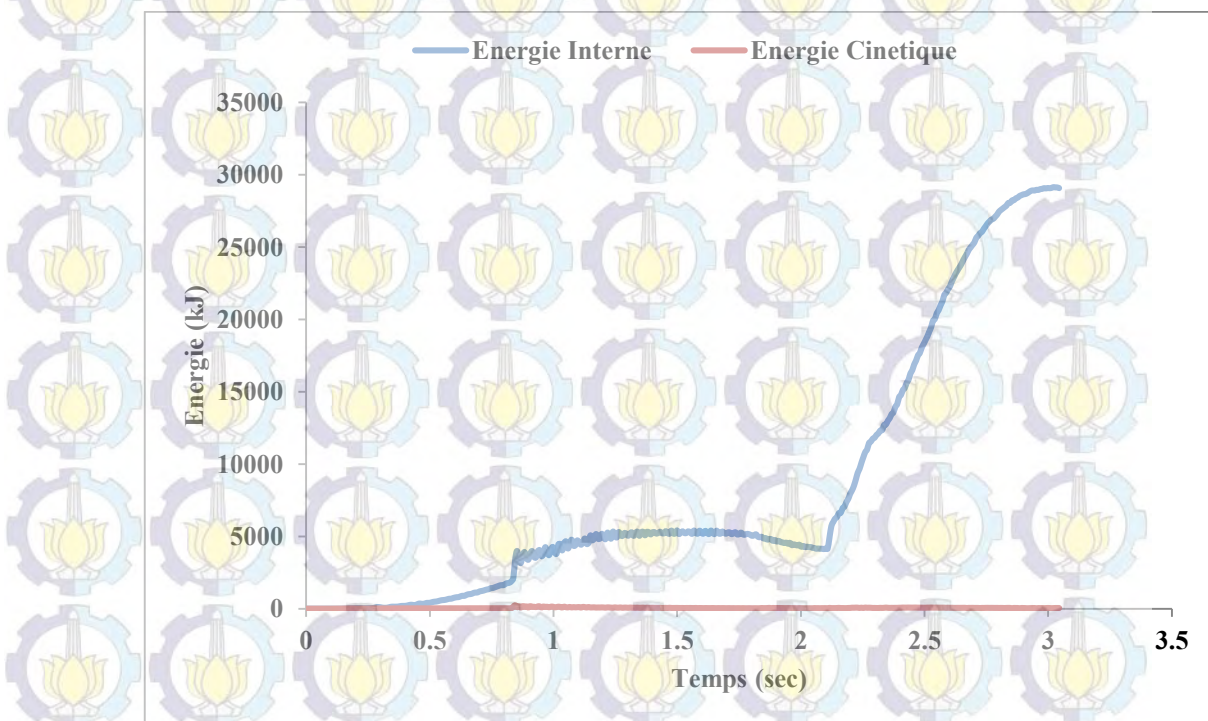


Figure 46. Energie interne-cinétique pour le grillage 100x120 mm avec 2 câbles

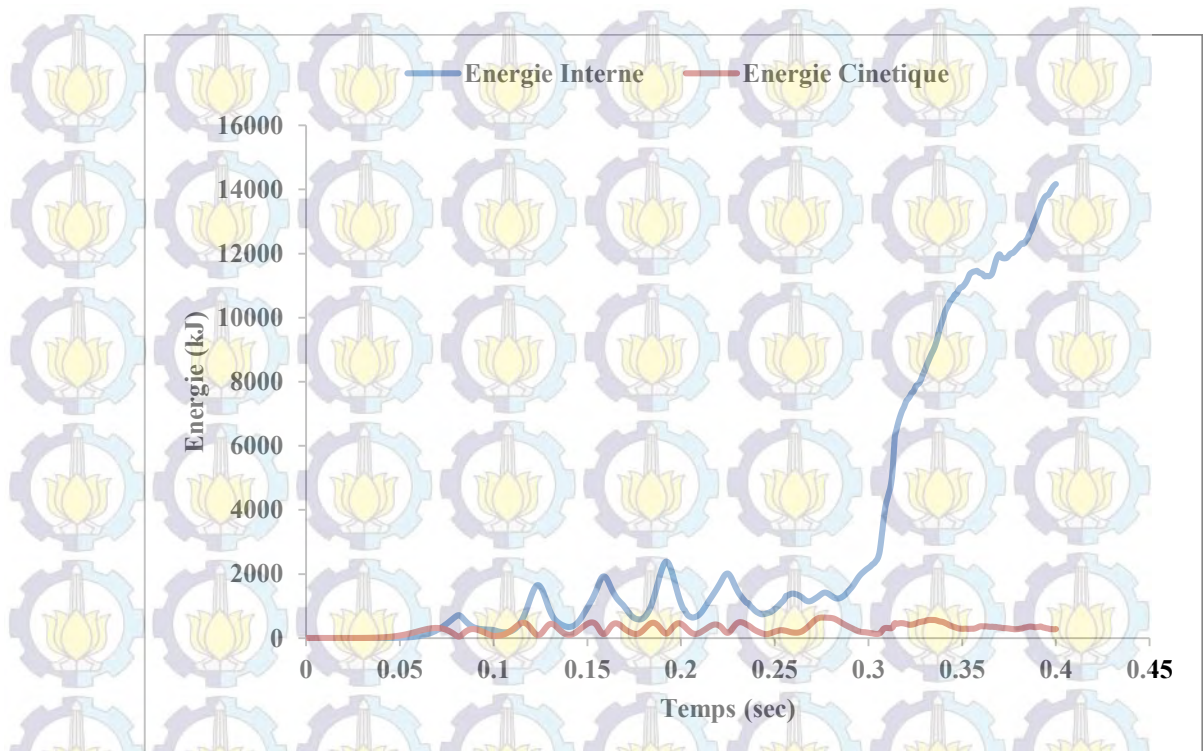
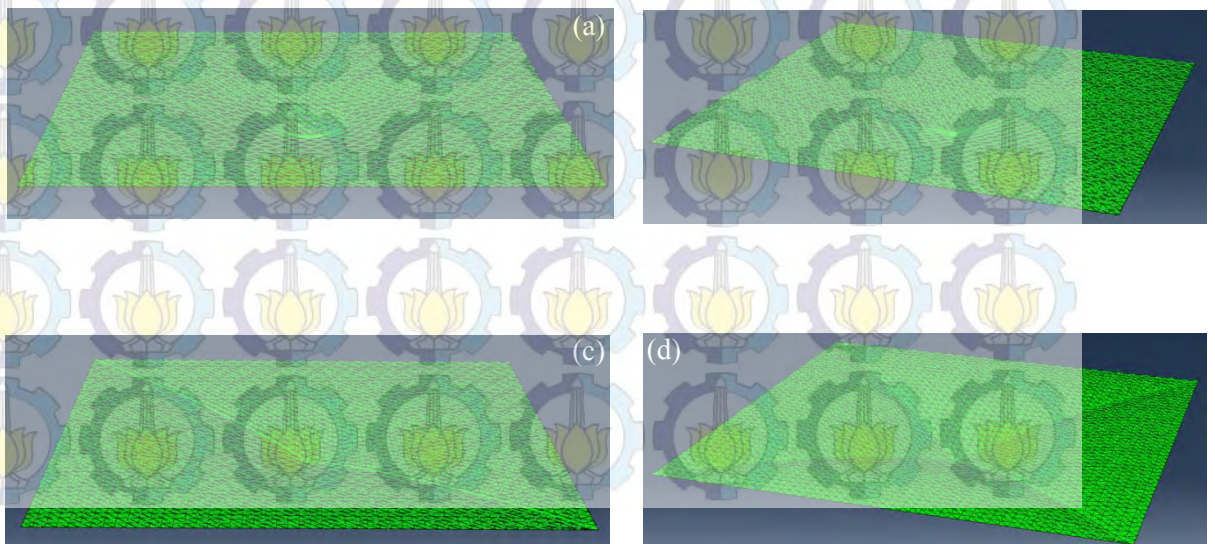


Figure 47. Energie interne-cinétique pour le grillage TECCO

4.5.2. Déformée des grillages

Après la modélisation des grillages en ABAQUS, les formes globales des déformées des grillages sont obtenues et comparées avec celle obtenues expérimentalement déformées. Ainsi, on a observé le déplacement et le comparer avec le résultat expérimental. Cette comparaison montre un bon accord qualitatif entre les résultats numériques et résultats expérimentaux. On voit que les déformations des grillages obtenues numériquement sont similaires à celles observées expérimentalement. Voici les images :





Après avoir vu la forme de déformée, nous passons en revue le déplacement qui se produit et de le comparer avec le résultat expérimental. Le point simulé est un point critique sur la membrane interne. Voici les résultats:



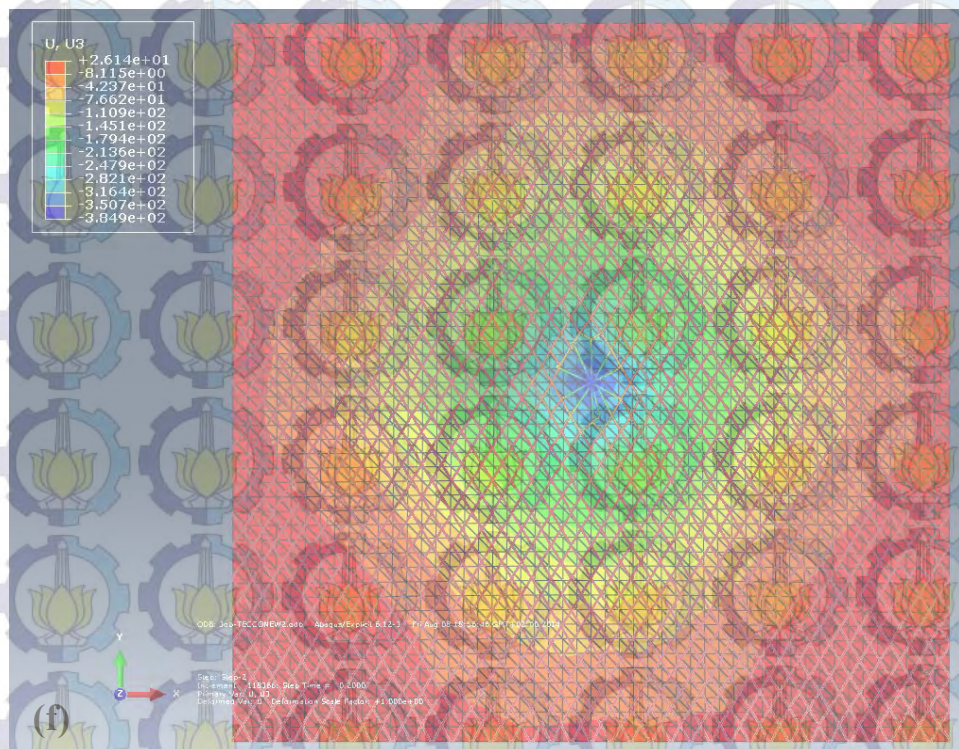


Figure 49. Iso-valeur du déplacement U_{33} (a) grillage non câblé 60x80, (b) grillage non câblé 100x120, (c) avec 1 câble, (d) avec 1 câble, (e) double grillage, (f), TECCO.

A partir de ces iso-valeurs, on peut résumer les déplacements obtenues et les comparer avec les résultats expérimentaux. Voici les résultats :

Configurations	Résultat expérimental (cm)	Résultat numérique (cm)
Grillage non câblé 60x80	27.8	26.85
Grillage non câblé 100x120	26.5	25.29
Double grillage	30.2	33.43
Grillage avec 1 câble	26.5	26.90
Grillage avec 2 câbles	34.1	34.20
TECCO	50.9	38.19

Tableau 11. Comparaison des déplacements expérimental et numérique

4.5.3. Courbe force-déplacement

Les courbes de force appliquée-déplacement obtenues par cette modélisation sont comparées avec les résultats expérimentaux. Car les données expérimentales sont disponibles uniquement pour le dispositif à échelle 1 de Grillage 60x80mm et de 2 câbles, alors je peux les comparer seulement dans deux cas.

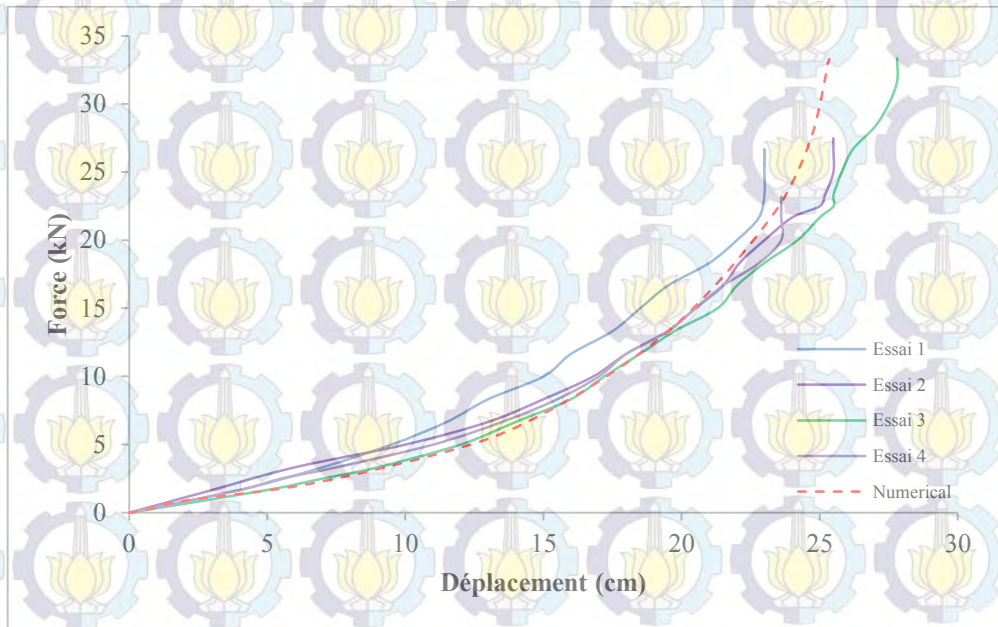


Figure 50. Résultats numérique/expérimental pour les grillages 60x80 sans câble

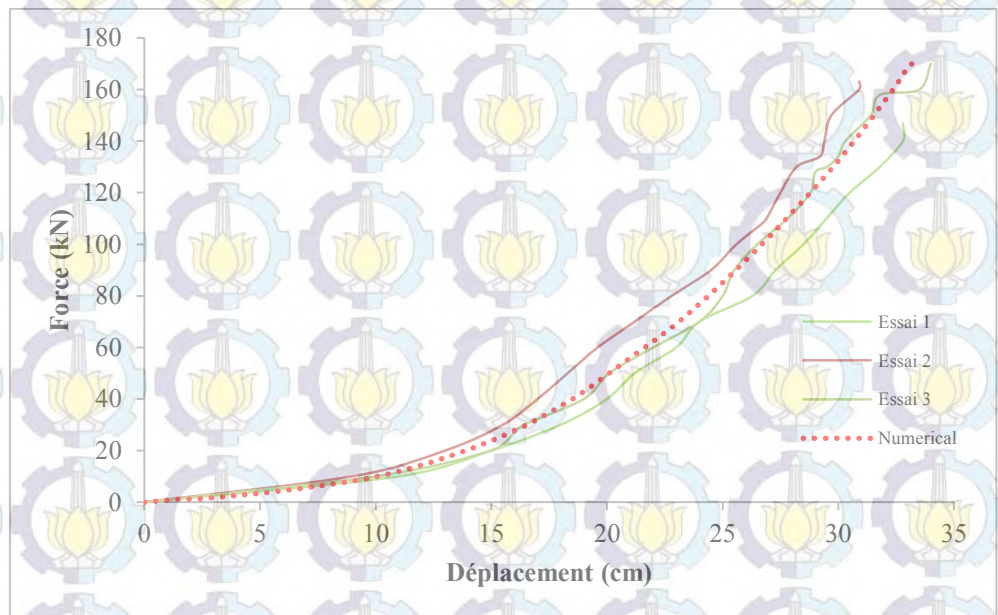


Figure 51. Résultats numérique/expérimental pour les grillages 100x120 avec 2 câbles

On remarque que les courbes des calculs numériques et ceux associés aux résultats expérimentaux, pour les grillages sont très proches.

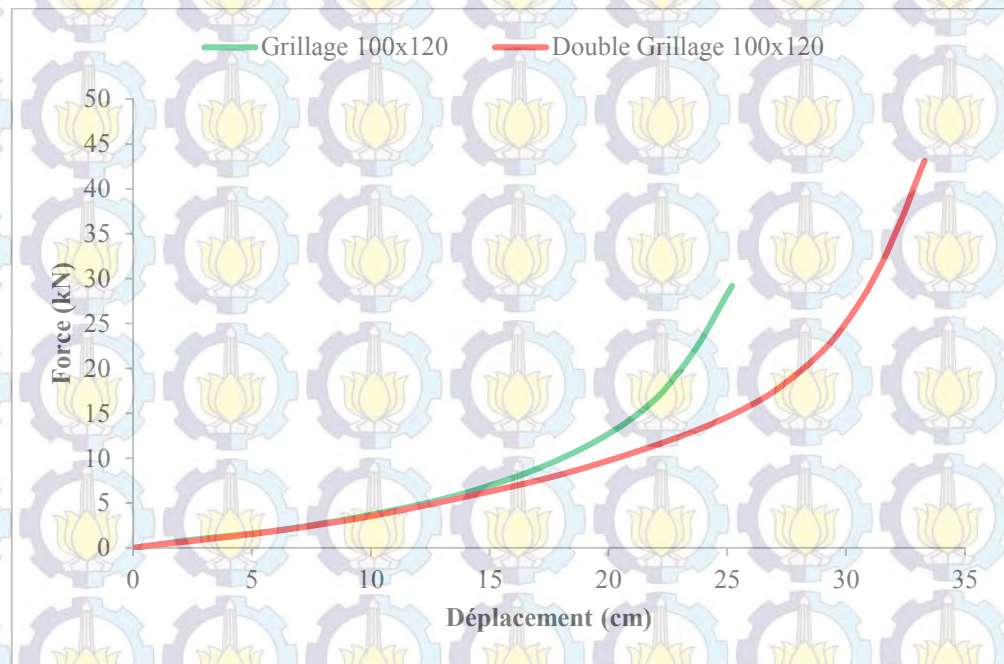


Figure 52. Comparaison numérique entre les grillages simple 100x120 et double grillages 100x120

On peut aussi comparer les résultats numériques entre le grillage 100x120 avec 1 câble et 2 câbles. Voici le résultat :

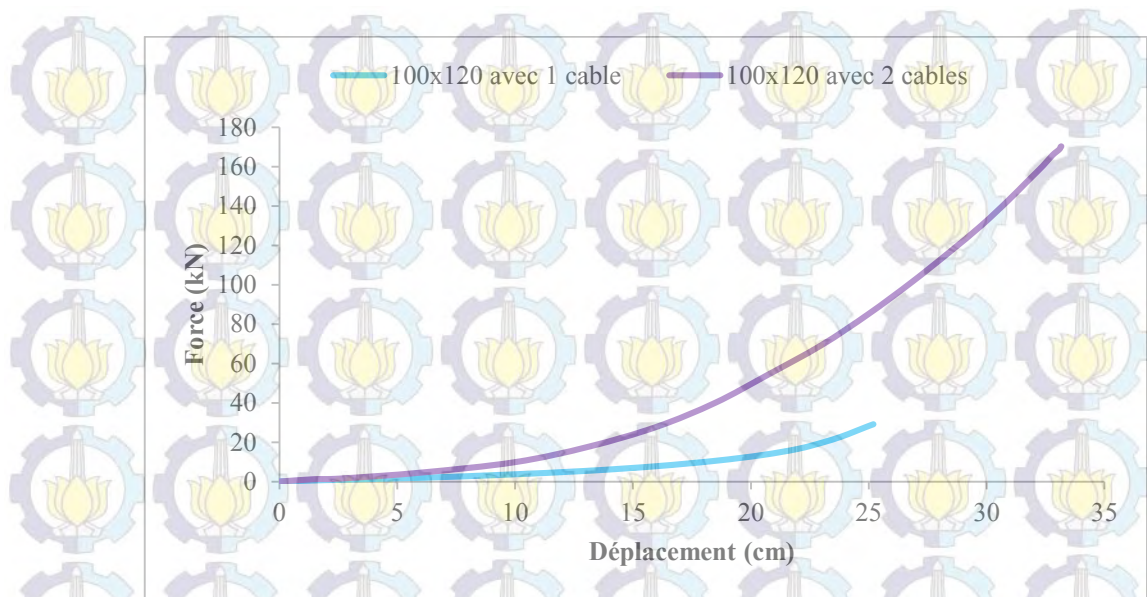


Figure 53. Comparaison numérique entre les grillages 100x120 avec 1 câble et 2 câbles

4.5.4. Limite d'élasticité

Tous les matériaux possèdent une limite d'élasticité, qui correspond à un chargement critique à partir duquel le comportement du matériau n'est plus réversible. Il peut y avoir rupture brutale (cas de verre), rupture progressive (cas du béton), mais dans la plupart des cas il y a plastification du matériau. Ceci signifie que sa forme est changée de façon irréversible, contrairement au domaine où le solide reprend sa forme initiale lorsque l'on relâche les efforts. (Fortunier, 2012)

La figure 52 représente une courbe de traction nominale obtenue sur un matériau solide. Cette courbe relie la contrainte nominale $\sigma_n = \frac{F}{S_0}$, où F est la force mesurée et S_0 la section initiale de l'éprouvette, à la déformation nominale ou est l'allongement de l'éprouvette et l_0 sa longueur initiale. Les points caractéristiques de cette courbe sont :

- La limite d'élasticité R_e , marquant le début de la déformation plastique (irréversible) du matériau
- La limite d'élasticité conventionnelle $R_{0,2}$, donnant la contrainte nominale nécessaire pour une déformation plastique de 0,2% (on utilise également avec la même

convention la quantité $R_{0,1}$ pour des matériaux peu ductiles, c'est-à-dire la déformation plastique est faible avant la rupture).

- La résistance à la traction R_m , contrainte nominale maximale observée (avant la striction)
- L'allongement à la rupture A_R , déformation nominal maximale admissible par le matériau avant rupture.

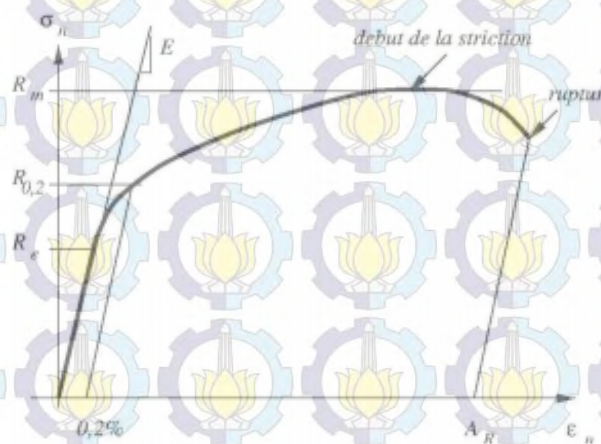


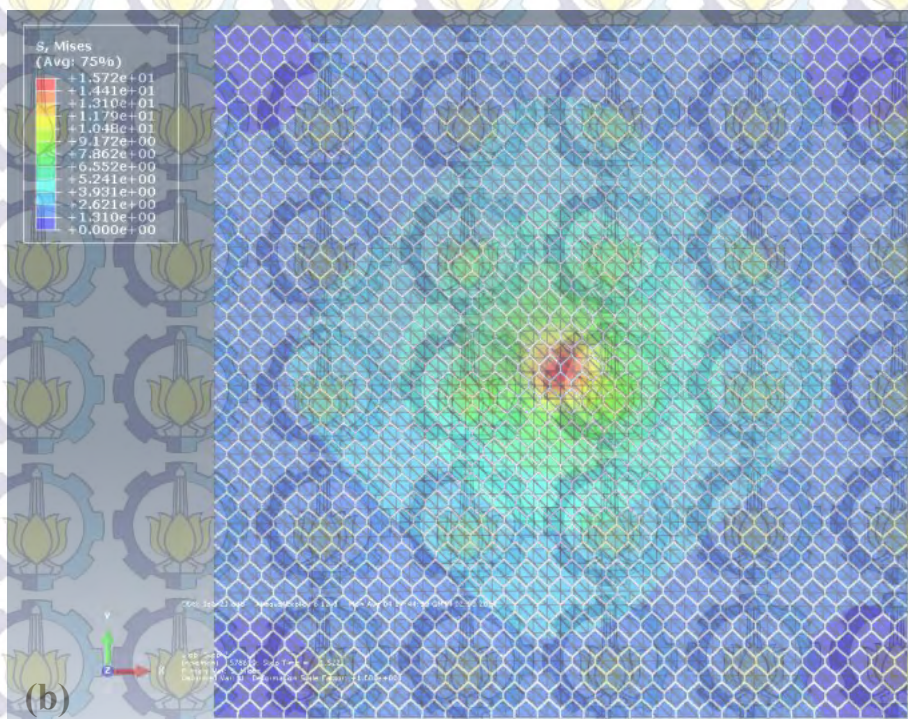
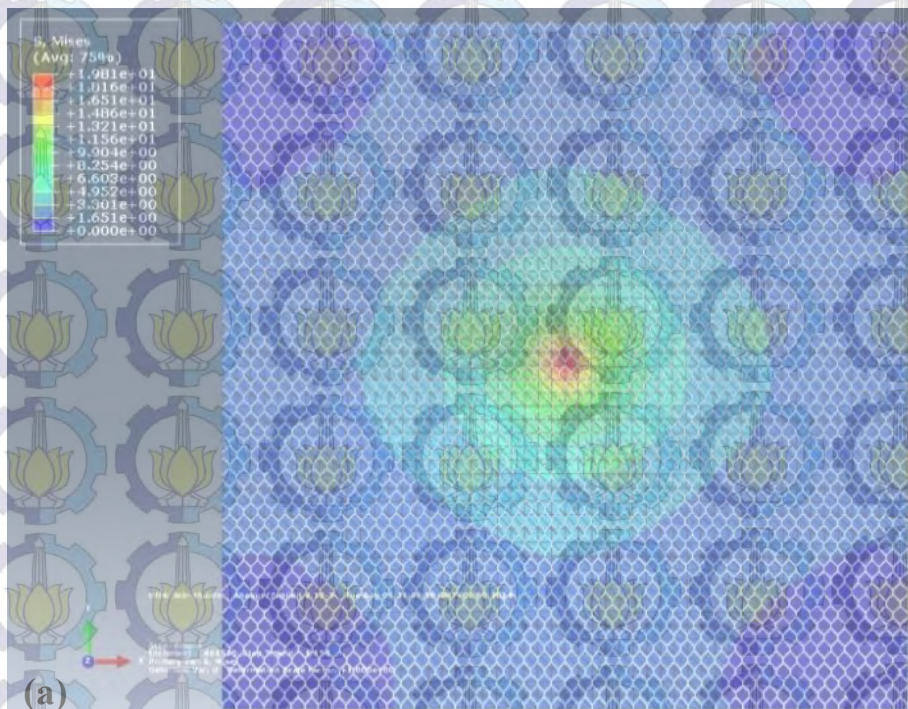
Figure 54. Courbe de traction nominale (Fortunier, 2012)

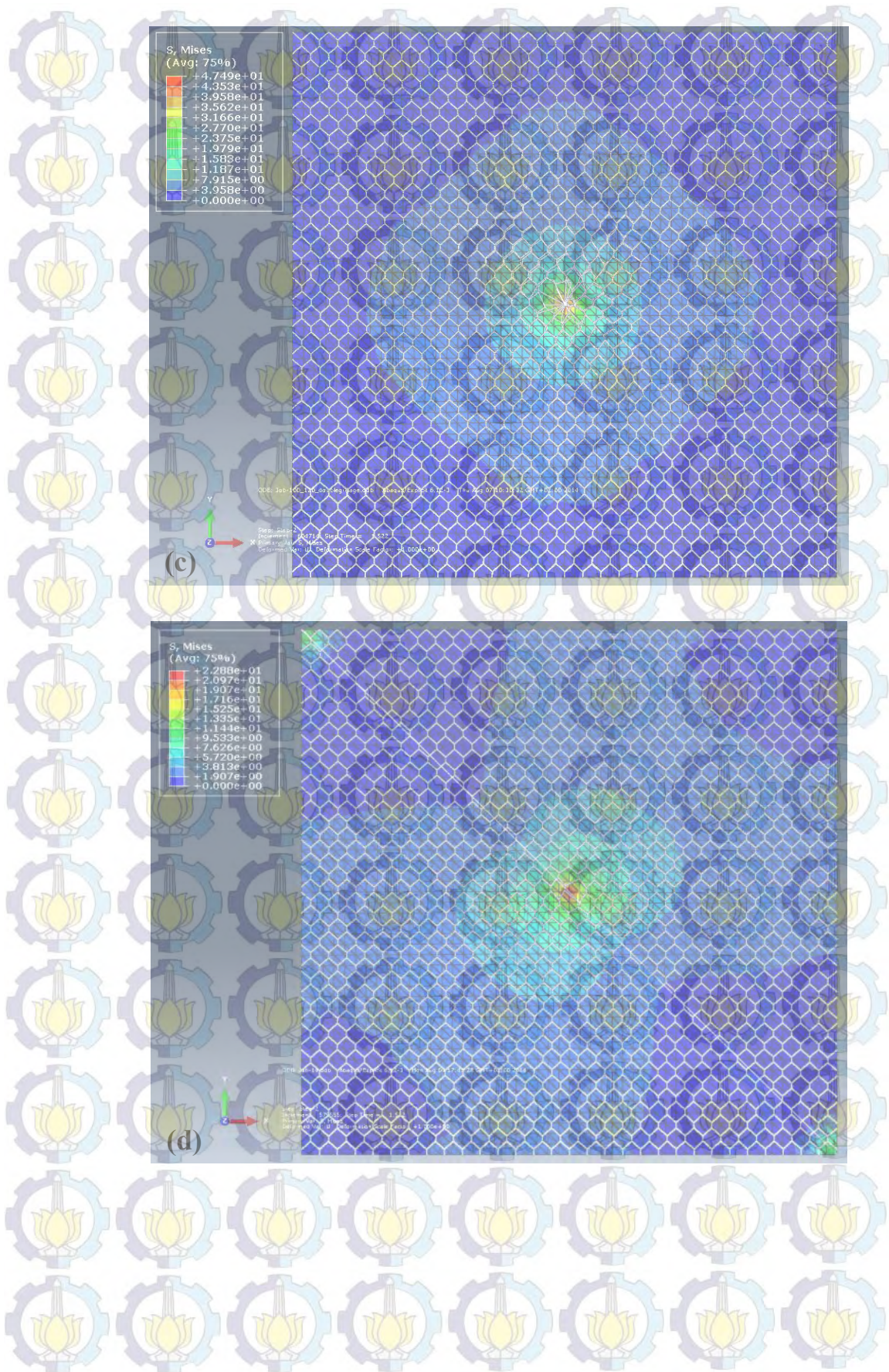
Le tableau 12 donne quelques valeurs numériques de R_e , R_m , et A_R pour différents matériaux. D'une façon générale, la limite d'élasticité d'un matériau est un scalaire, souvent noté σ_0 . Il s'agit de la contrainte vraie (F/S) appliquée au matériau lorsqu'apparaît la plastification. Elle est donc légèrement différente de la valeur R_e de la figure dd, qui est définie comme la contrainte nominale (F/S_0) appliquée en ce même point. Toutefois, le changement de section du matériau dans le domaine d'élasticité en traction est souvent très faible, de sorte que l'on confond en général ces deux valeurs. Par contre, il est très important de ne pas confondre σ_0 et $R_{0,2}$ (limite d'élasticité conventionnelle).

Matériau	R_e en MPa	R_m en MPa
Acier doux	220	430
Aluminium	40	200
Grillage 500 MPa	400	500
Câble en acier	900	1300

Tableau 12. Propriétés de quelques matériaux

On obtient aussi les iso-valeurs de la contrainte Von Mises en membrane à chaque configuration. Voici les résultats :





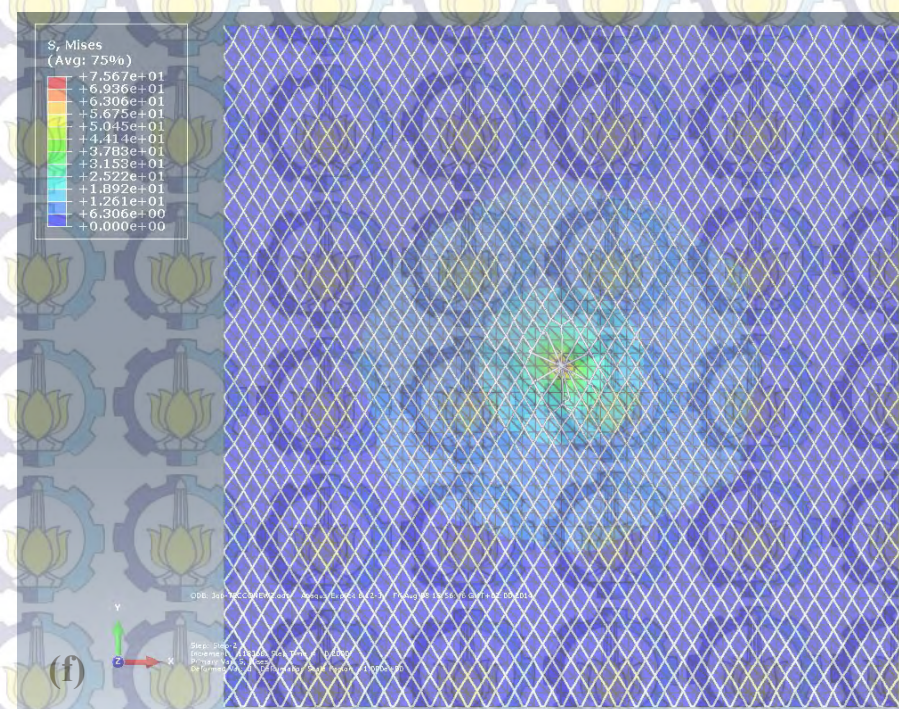
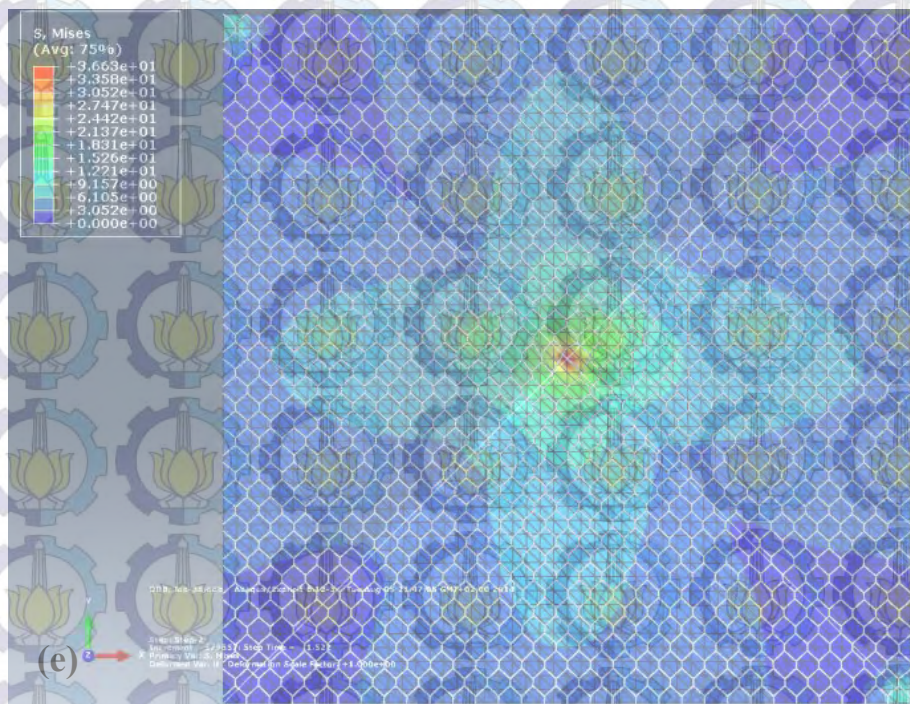


Figure 55. Iso-valeur de la contrainte Von Mises (a) grillage non câblé 60x80, (b) grillage non câblé 100x120, (c) double grillage, (d) avec 1 câble, (e) avec 2 câbles, (f), TECCO.

Configurations	S Mises max (N/mm2)
Grillage non câblé 60x80	19.81
Grillage non câblé 100x120	15.72
Double grillage	47.49
Grillage avec 1 câble	22.88
Grillage avec 2 câbles	36.63
TECCO	75.67

Tableau 13. Résumé des contraintes Von Mises en analyse numérique

Voici les résultats d'iso-valeur de contrainte maximale à chaque configuration de grillage. Les images sur la droite (élargis) montrent où se trouve la contrainte maximale.

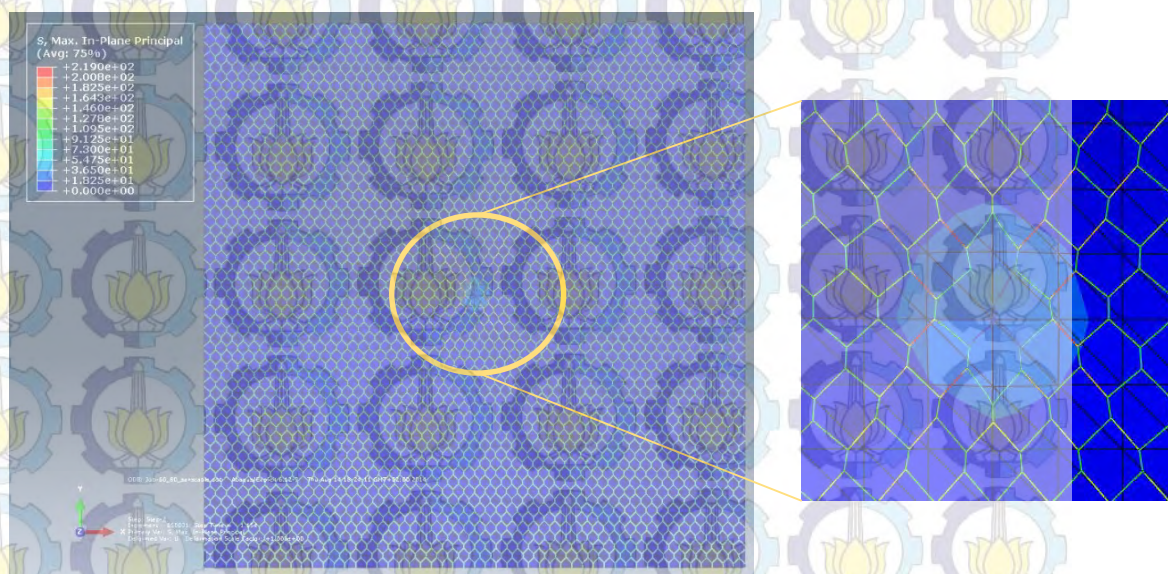
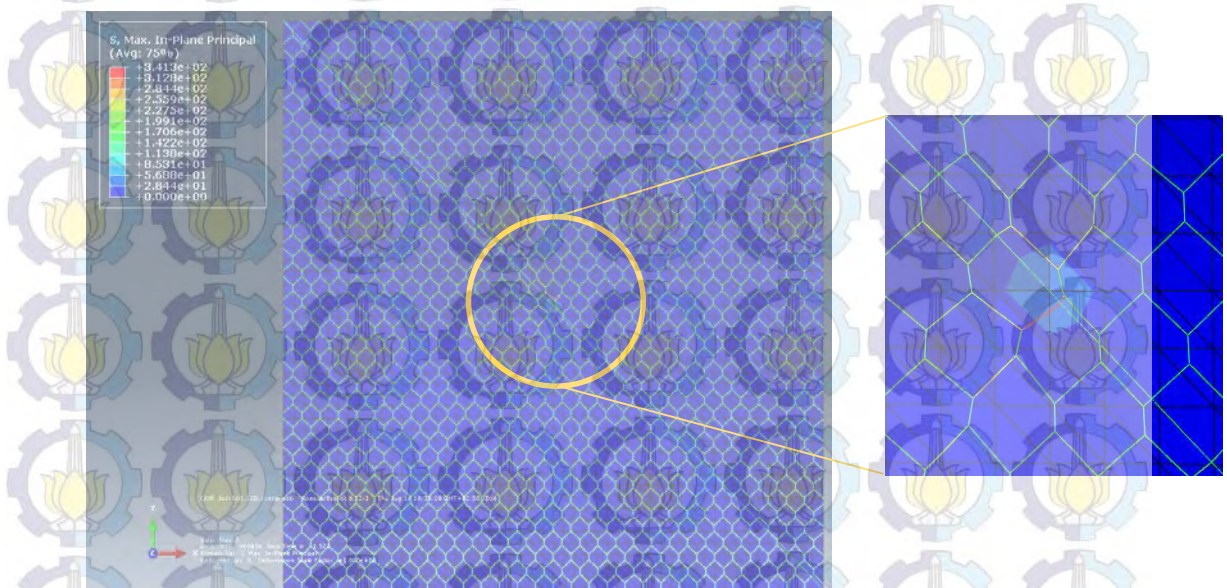
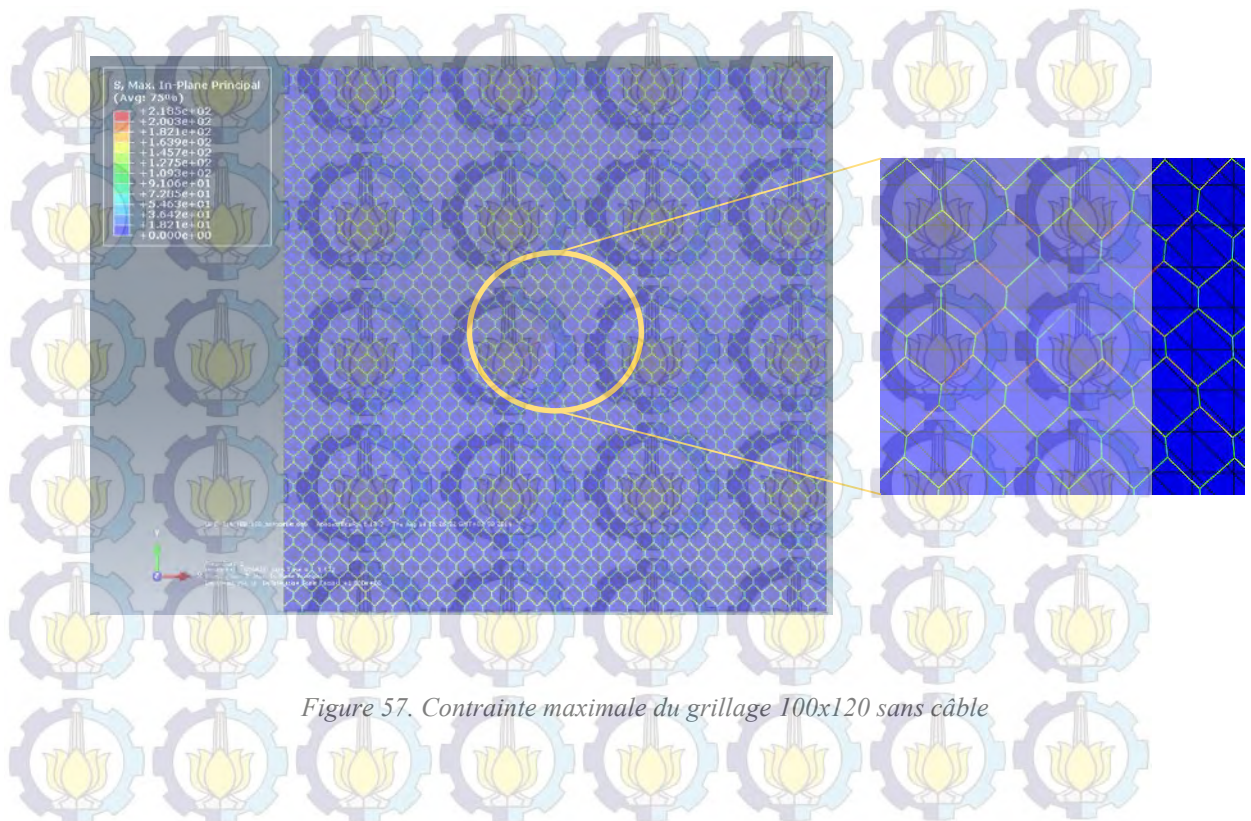


Figure 56. Contrainte maximale du grillage 60x80 sans câble



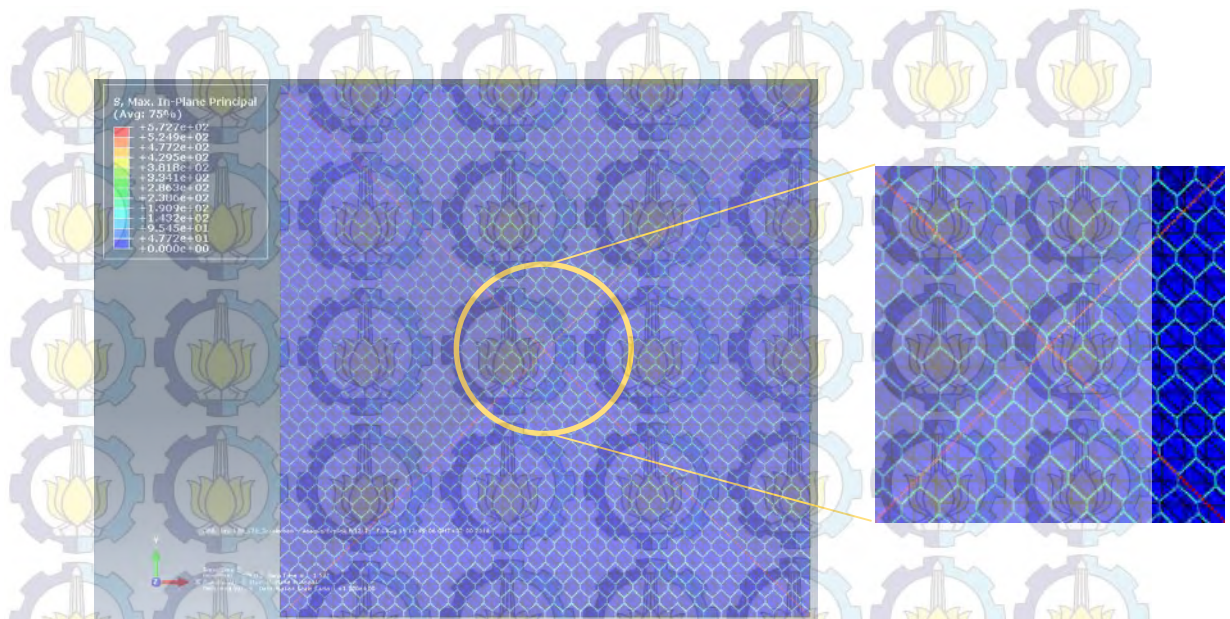


Figure 59. Contrainte maximale du grillage 100x120 2 câbles

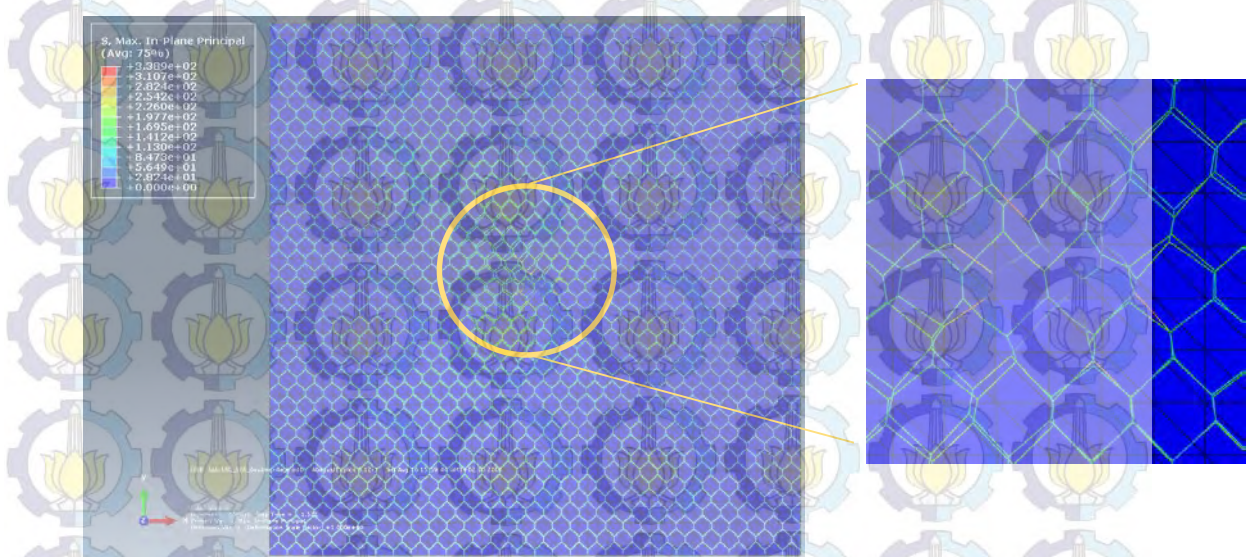
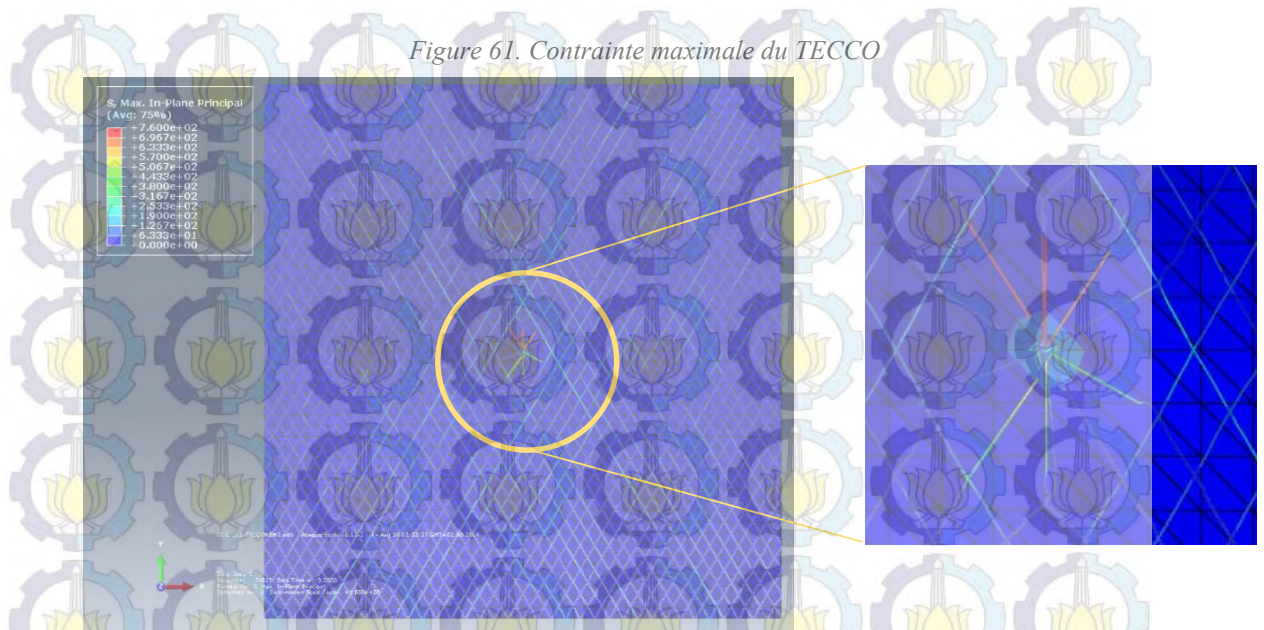


Figure 60. Contrainte maximale de double grillage 100x120

Figure 61. Contrainte maximale du TECCO



Après avoir faire la modélisation, on remarque que tous les configurations des grillages sans câble (le grillage 60x80, le grillage 100x120, et le double grillage 100x120) ne dépassent pas leur résistance à la traction. Ils travaillent alors dans domaine élastique.

De plus, pour les configurations de grillages avec câble, ils travaillent aussi dans le domaine élastique, alors que la location où se trouve la contrainte maximale situé dans l'élément différent.

Configurations	Limite d'élasticité (N/mm ²)	S max (N/mm ²)	Location où se trouve contrainte max	Notes
Grillage non câblé 60x80	276	219	Grillage	Elastique
Grillage non câblé 100x120	276	218	Grillage	Elastique
Double grillage	276	338	Grillage	Plastique
Grillage avec 1 câble	276	341	Grillage	Plastique
Grillage avec 1 câble	550	200	Câble	Elastique

Grillage avec 2 câbles	276	286	Grillage	Plastique
Grillage avec câbles	550	572	Câble	Plastique
TECCO	550	760	Grillage	Plastique

(a) : aluminium (b) : acier (c) : TECCO

Tableau 14. Résumé des contraintes maximales

BIBLIOGRAPHIE

ACI. Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures, with appendix B, "Steel Embedments". Detroit : American Concrete Institute, 1997, 48p.

ALUMINUM ASSOCIATION, INC. Aluminum Standards and Data 2000. Disponible sur : <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6063T6>. (consulté le 13.07.2014).

BENCHISSOU, Alain. Comment réaliser une étude de convergence de maillage. In : Aplicit. Disponible sur : <http://www.aplicit.com/blog/technique/comment-realiser-une-etude-de-convergence-de-maillage/> (consulté le 30.07.2014).

BERTRAND, D., NICOT, F., GOTTELAND, P., et al. Discrete element method (DEM) numerical modeling of double-twisted hexagonal mesh. Canadian Geotech Journal, 2008, n° 45 (8), pp. 1104-1117.

BRENNER, S., SCOTT, L. The Mathematical Theory of Finite Element Method. 3^{ème} édition. Berlin : Springer-Verlag, 2002, 393 p.

DEL COZ DÍAZ, J.J., NIETO, P.J., MAZÓN, F., R., et al. Design and finite element analysis of a wet cycle cement rotary kiln. Espagne: Finite Elements in Analysis and Design, 2002, n° 39 (1), pp. 17-42.

FORTUNIER, Roland. Comportement mécanique des matériaux : document de cours. Professeur. Saint-Etienne : ENS des Mines de Saint-Etienne, 2012, 83p.

FRESNO, D.C., DIAZ, J.J., LOPEZ, L.A., et al. Evaluation of the resistant capacity of cable nets using the finite element method and experimental validation. International journal Engineering Geology, 2008, n° 100, pp. 1-10.

HOBST, L., ZAJIC, J. Anchoring in rock and soil. Elsevier Scientific Publishing Company, 1983, New York.

JEANNIN, François. Projet d'étude des grillages ancrés plaqués : rapport de stage. Licence. Grenoble : Polytech Grenoble, 2013, 58p.

MAWLOOD, B.O. Etude de l'interaction flambage/rupture dans le cas de la propagation ductile d'une fissure : rapport de stage. Master. Lyon : INSA de Lyon, 2012, 64p.

MUHUNTHAN, B., SHU, S.Z., SASIHARAN, N., et al., in press, Analysis and Design of Wire Mesh/Cable Net Slope Protection, Washington State Department of Transportation Report.

THOENI, K., LAMBERT, C., GIACOMINI, A., et al. Discrete modelling of hexagonal wire meshes with a stochastically distorted contact model. International journal of Computers and Geotechnics, 2013, vol. 49, pp. 158-169.

TRAD, Ayman. Analyse du comportement et modélisation de structures souples de protection: le cas des écrans de filets pare-pierres sous sollicitations statique et dynamique. Thèse MEGA. Lyon : INSA de Lyon, 2011, 214p.

POTULA, S.,R., SOLANKI, K.,N., OGLESBY, D.,L., et al. Investigating occupant safety through simulating the interaction between side curtain airbag deployment and an out-of-position occupant. International journal of Accident Analysis and Prevention, 2012, vol. 49, pp. 392-403.

SASIHARAN, N., MUHUNTHAN, B., BADGER, T.C., et al. Numerical analysis of the performance of wire mesh and cable net rockfall protection systems. International journal of Engineering Geology, 2006, vol. 88, pp. 121-132.

SHU, S.,Z., MUHUNTHAN, B., BADGER, T.C., et al. Load testing of anchors for wire mesh and cable net rockfall slope protection systems: International journal of Engineering Geology, 2005, vol. 79, pp. 162-176.

SIMULIA INC., ABAQUS 6.12-3 Documentation, Providence, New Jersey, Etats-Unis.

WIKIPEDIA. The Free Encyclopedia : Ultimate tensile strength. Disponible sur : http://en.wikipedia.org/wiki/Ultimate_tensile_strength. (consulté le 13.07.2014).

WIKIPEDIA. The Free Encyclopedia : Young's modulus. Disponible sur : http://en.wikipedia.org/wiki/Young's_modulus. (consulté le 13.07.2014).

ZIENKIEWICZ, O., TAYLOR, R. The Finite Element Method: Solid and Fluid Mechanics and Non-linearity. Londres : McGraw-Hill Book Company, 1991.



CONCLUSION

- L'utilisation Abaqus/Explicit permet de modéliser un problème quasi-statique avec le contact complexe, donc grillage ancré plaqué. Elle donne des résultats similaires aux tests expérimentaux.
- Le déplacement maximal et la contrainte maximale se trouvent toujours au centre du grillage.
- Les différences entre le calcul et le test viennent des paramètres du matériau utilisé et des simplifications dans la modélisation numérique.
- Les tests de caractérisation du matériau seront menés dans l'avenir pour donner des vraies entrées dans le calcul numérique . Ils permettent de comparer les modes de rupture finaux sur le grillage et le câble.
- Les modèles de filet en réalité seront modélisés pour estimer ses capacités portantes.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

